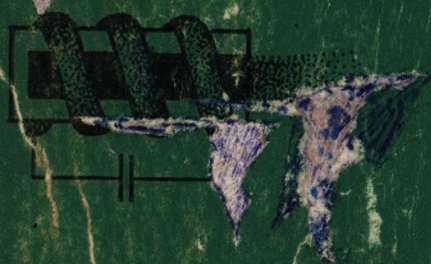


Лаб. 13
89-50

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

2

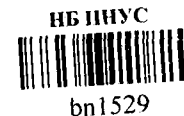


ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

ч. 2

За загальною редакцією
професора В. П. Дущенка

*Допущено Міністерством освіти УРСР
як навчальний посібник для студентів
педагогічних інститутів*



КИЇВ
ГОЛОВНЕ ВИДАВНИЦТВО
ВИДАВНИЧОГО ОБ'ЄДНАННЯ «ВИЩА ШКОЛА»
1984

Физический практикум. : В 2-х ч. / Под общ. ред. Ду-
щенко В. П. — К. : Вища школа. Главное изд-во,
1984. — Ч. 2. 256 с. — Укр.

В пособии описаны лабораторные работы к разделам
курса общей физики: электричество и магнетизм, оптика,
физика твердого тела, атомная и ядерная физика. Основ-
ное внимание уделено принципам и методам изучения фи-
зических явлений, определения характерных физических
величин, технике выполнения лабораторных работ. Все
физические величины даны в СИ.

Предназначено для студентов физико-математических
факультетов педагогических институтов.

Ил. 177. Табл. 24. Библиогр.: 31 назв.

Коллектив авторов: В. П. Дущенко, В. М. Бара-
новский, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук, М. І. Шут

Рецензенты: кандидаты физико-математических наук
профессор М. Є. Фонкич (Черкаський педагогічний інсти-
тут) і доцент В. П. Ромбах (Ворошиловградський педа-
гогічний інститут)

Редакція літератури з математики і фізики

Зав. редакцією Є. Л. Корженевич

Організація лабораторних занять і питання техніки безпеки [1—6]

Лабораторні заняття з фізики у вищих навчальних закладах кра-
їни, зокрема в педагогічних інститутах, мають на меті поглибити тео-
ретичні знання студентів, ознайомити їх з сучасними технічними
засобами і методами вимірювання, а також сприяти докладнішому
вивченню фізичних понять, явищ і законів. Тим самим підкреслюєть-
ся експериментальний характер фізики як науки.

Майбутній спеціаліст — учитель фізики — повинен в процесі ви-
конання лабораторних робіт оволодіти основними навиками прове-
дження експериментів і оцінки їх результатів, потрібними для забез-
печення сучасного рівня викладання фізики в середній школі.

Останнім часом в роботі кафедр фізики вузів сформувалася тенден-
ція практикувати проведення лабораторних робіт за комплексною
тематикою, яка об'єднується певною науковою ідеєю, властивою лек-
ційному курсу. Цієї тенденції дотримуються й автори пропонованого
навчального посібника. Саме тому лабораторні заняття становлять не-
від'ємну частину курсу.

Значну роль в забезпеченні ефективності лабораторних занять ві-
діграє організація їх. Усі необхідні відомості щодо цього студенти
одержують під час вступних занять до лабораторного практикуму.
Звертається увага, зокрема, на порядок оформлення звітів. Зразки
цієї роботи повинні бути в навчальних лабораторіях. Однак це не озна-
чає, що студенти мають користуватися готовими формами звітів, за-
носячи до таблиць лише цифрові дані досліджень. Подібна практика
зв'яже ініціативу студентів. Очевидно, раціональніше було б практи-
кувати вільні форми звітів, які пропонуються самими студентами.

Для оцінок точності вимірювань, а також обчислення похибок вимі-
рювань пропонуємо користуватися відомостями з першої частини «Фі-
зичного практикуму». Як показує досвід, для ініціативного виконання
лабораторної роботи з елементами науково-дослідницького характеру
великого значення набуває написання студентами висновків з аналі-
зом одержаних результатів. В них можуть бути як загальна оцінка
певного методу вимірювання фізичних величин або дослідження фі-
зичного явища, так і конкретна оцінка реалізації цього методу при
використанні тих чи інших вимірювальних приладів і пристроїв,
рекомендації щодо вибору оптимальних умов дослідження і можли-
вого зменшення похибок вимірювання тощо.

Ф 1704000000 — 127

M211(04) — 84 — 115—82

БІОТЕКА

Інституту
фізико-математичних наук
Української Академії Наук

Видавниче об'єднання
«Вища школа», 1984

При виконанні лабораторних робіт з електрики і магнетизму слід неухильно дотримуватися таких правил:

1. Точно виконувати вимоги внутрішнього розпорядку, встановленого в лабораторії, і суворо дотримуватися правил техніки безпеки під час роботи з електричними установками.

2. На вступному занятті в лабораторії ознайомитися з розміщенням робочих місць, призначенням різних комутаційних елементів, встановлених на робочих столах і щитках.

3. Вмикати електричну напругу і розпочинати виконання роботи лише з дозволу викладача або лаборанта після перевірки ними електричної схеми.

4. Категорично забороняється лишати без нагляду схеми або окремі вимірювальні прилади і засоби.

5. Самостійно виконувати лабораторну роботу. Проявляти максимум ініціативи у подоланні можливих труднощів. Звертатися до викладача або лаборанта лише тоді, коли вичерпані всі можливості розв'язання лабораторної роботи.

6. Про можливі несправності приладів і апаратури доповідати керівникові заняття. Самостійне усунення їх забороняється.

7. Після подання викладачеві акуратно, розбірливо і чітко виконаних записів результатів вимірювання розібрати схему. Прилади і апаратуру розмістити в такому порядку, в якому вони були до початку роботи.

Виконуючи лабораторну роботу, студенти мають справу з обладнанням, приладами, електричними схемами, в яких проходить електричний струм. Слід пам'ятати, що легковажність, неакуратність в користуванні ними можуть призвести до нещасних випадків, пошкоджень вимірювальних приладів, виникнення пожежі.

Перед початком лабораторних занять керівник проводить інструктаж з техніки безпеки. Про це робиться відповідний запис у спеціальному лабораторному журналі.

Вважають, що пороги подразнюючого струму знаходяться в межах 1—5 мА, невідпускаючого (людина самостійно не може відірватися від електричного кола) — для чоловіків в межах 11—12 мА, для жінок — 7—8 мА (в окремих випадках для чоловіків — 18 мА, для жінок — 10 мА). Струм силою від 26 до 30 мА, проходячи через тіло людини, призводить до певних уражень, а силою 30—100 мА — до знепритомлення і навіть смерті. Проте відомі випадки тяжких і смертельних уражень струмом, значно меншим за визначені межі. Це залежить від стану людини, а також від напруги електроустановок, електричного опору всіх елементів кола, по яких проходить струм, включаючи й опір тіла. Останній залежить від багатьох факторів, зокрема стану шкірного покриву, ступеня втомленості, стану нервової системи тощо. Із збільшенням частоти струму загроза ураження зменшується. Найнебезпечніші для людини струми частотою 40—60 Гц. При частотах понад 100 Гц загроза ураження різко зменшується. Ступінь ураженості електричним струмом залежить також від часу його проходження через організм. При тривалій дії навіть незначний струм може призвести до тяжких наслідків.

Найважливіші одиниці Міжнародної системи (СІ)

Фізична величина	Одиниця		
	Найменування	Позначення	
		українське	міжнародне
Електрика і магнетизм			
Густина електричного струму	ампер на квадратний метр	А/м²	A/m²
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	A/m
Кількість електрики (електричний заряд)	кулон	Кл	C
Електрична напруга, електричний потенціал, різниця електричних потенціалів, електрорушійна сила	вольт	В	V
Електрична ємність	фарад	Ф	F
Електричний опір	ом	Ом	Ω
Електрична провідність	сименс	См	S
Потік магнітної індукції, магнітний потік	вебер	Вб	Wb
Густина магнітного потоку, магнітна індукція	тесла	Тл	T
Індуктивність, взаємна індуктивність	генрі	Гн	H
Просторова густина електричного заряду	кулон на кубічний метр	Кл/м³	C/m³
Електричне зміщення	кулон на квадратний метр	Кл/м²	C/m²
Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	V/m
Абсолютна діелектрична проникність	фарад на метр	Ф/м	F/m
Абсолютна магнітна проникність	генрі на метр	Гн/м	H/m
Світло і пов'язані з ним електромагнітні випромінювання			
Енергетичні величини			
Енергія випромінювання	джоуль	Дж	J
Об'ємна густина енергії випромінювання	джоуль на кубічний метр	Дж/м³	J/m³
Потік випромінювання, потужність випромінювання	ват	Вт	W
Поверхнева густина потоку випромінювання			
Енергетична світність (випромінюваність)	Ват на квадратний метр	Вт/м²	W/m²
Енергетична освітленість (опромінюваність)			
Енергетична експозиція (промениста експозиція)	джоуль на квадратний метр	Дж/м²	J/m²
Енергетична сила світла (сила випромінювання)	ват на стерадіан	Вт/ср	W/sr
Енергетична яскравість (променистість)	ват на стерадіан-квадратний метр	Вт/(ср × м²)	W/(sr · m²)
Спектральна густина енергетичної світності за довжиною хвилі	ват на метр в кубі	Вт/м³	W/m³
Спектральна густина енергетичної сили світла з довжиною хвилі	ват на метр-стерадіан	Вт/(м × ср)	W/(m · sr)
Спектральна густина енергетичної яскравості за довжиною хвилі	ват на стерадіан-метр в кубі	Вт/(ср × м³)	W/(sr · m³)
Лінійний показник поглинання	метр в мінус першому степені	м ⁻¹	m ⁻¹

Продовження таблиці

Фізична величина	Одиниця		
	Найменування	Позначення	
		українське	міжнародне
Світлові величини			
Світловий потік	люмен	лм	lm
Спектральна світлова ефективність (спектральний світловий еквівалент потоку випромінювання; видність випромінювання)	люмен на ват	лм/Вт	lm/W
Освітленість	люкс	лк	lx
Світність	люмен на квадратний метр	лм/м ²	lm/m ²
Яскравість	кандела на квадратний метр	кд/м ²	cd/m ²
Світлова експозиція	люкс-секунда	лк·с	lx·s
Світлова віддача джерела	люмен на ват	лм/Вт	lm·W
Додаткові величини			
Стала обертання площини поляризації	радіан на метр	рад/м	rad/m
Питома стала обертання площини поляризації	радіан-метр в квадраті на кілограм	рад × м ² /кг	рад·м ² /kg
Іонізуючі випромінювання			
Енергія іонізуючого випромінювання	джоуль	Дж	J
Поглинута доза випромінювання (доза випромінювання)	грей	Гр	Gy
Потужність поглинутої дози випромінювання (потужність дози випромінювання)	грей в секунду	Гр/с	Gy/s
Інтенсивність випромінювання (густина потоку енергії)	ват на квадратний метр	Вт/м ²	W/m ²
Активність нукліда в радіоактивному джерелі	бекерель	Бк	Bq
Питома активність	бекерель на кілограм	Бк/кг	Bq/kg
Період піврозпаду	секунда	с	s
Стала розпаду	секунда у мінус першому степені	с ⁻¹	s ⁻¹
Лінійний коефіцієнт ослаблення	метр у мінус першому степені	м ⁻¹	m ⁻¹
Масовий коефіцієнт ослаблення	квадратний метр на кілограм	м ² /кг	m ² /kg
Масовий коефіцієнт поглинання	метр	м	m
Довжина середнього пробігу	джоуль на метр	Дж/м	J/m
Гальмівна здатність (лінійна)	джоуль-квадратний метр на кілограм	Дж × м ² /кг	J·m ² /kg
Масова гальмівна здатність			

Виконуючи роботи з атомної фізики, слід дотримуватися таких основних положень техніки безпеки:

1. Забороняється брати і користуватися радіоактивним джерелом без дозволу відповідального за його зберігання. Одержуючи та здаючи радіоактивне джерело, студент повинен розписатися в спеціальному журналі обліку ізотопів.

2. Під час виконання роботи радіоактивне джерело має знаходитися за свинцевим захистом і вийматися звідти тільки після закінчення роботи.

3. Категорично забороняється передавати радіоактивне джерело іншим бригадам.

4. В лабораторії, де працюють з радіоактивними джерелами (закритими і відкритими), категорично забороняється їсти, курити, користуватися косметикою.

5. У випадку руйнування або розгерметизації радіоактивного джерела слід негайно повідомити відповідального за зберігання ізотопів, ретельно обстежити місце роботи за допомогою дозиметра.

В таблиці на с. 5,6 наведено найважливіші похідні одиниці фізичних величин в електриці, магнетизмі, оптиці і ядерній фізиці.

Розділ третій

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

1. Вивчення принципу дії і основних характеристик електровимірювальних приладів [7—9, 17, 21]

Електровимірювальний прилад — це сукупність засобів, за допомогою яких здійснюється вимірювання певної електричної величини.

В приладах безпосередньої оцінки вимірювана величина визначається стрілочним або цифровим способом відліку, або з допомогою світлового «зайчика» на градуйованій шкалі. Це — амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, гальванометри.

До приладів порівняння належать численні компенсатори, електровимірювальні містки, електронні вольтметри. В них вимірювана величина визначається порівнянням з відомою однорідною величиною.

Для вимірювання електричних величин в приладах безпосередньої оцінки використовують фізичні явища, на основі яких створюються обертальний момент і наступне переміщення рухливої системи приладу. Обертальний момент утворюється внаслідок взаємодії постійного магніту і струму в котушці, магнітного поля котушки з струмом і феромагнетиком, взаємодії магнітних полів котушок з струмами, взаємодії заряджених тіл. Залежно від використовуваного в приладі принципу взаємодії розрізняють такі системи електровимірювальних приладів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, індукційну, електростатичну, термоелектричну, детекторну, вібраційну. Прилади різних систем реагують на різні значення вимірюваної величини (середні, діючі, амплітудні і т. д.).

Якість електровимірювальних приладів визначається чутливістю, похибками вимірювання, реагуванням на зовнішні електричні і магнітні поля та зміну температури, межами вимірювань, тривалістю щодо перевантажень тощо.

Чутливістю електровимірювальних приладів називають відношення лінійного або кутового зміщення покажчика приладу $\Delta\alpha$ до зміни вимірюваної величини Δx , яка зумовила це зміщення:

$$s = \Delta\alpha / \Delta x.$$

Величина $S = 1/s$, обернена до чутливості, дістала назву ціни поділки приладу.

Для характеристики точності електровимірювальних приладів використовують так звані *зведені похибки*:

$$\gamma_{\text{зв}} = |\pm \Delta x / x_{\text{н}}| \cdot 100 \%,$$

де Δx — абсолютна похибка вимірюваної величини; $x_{\text{н}}$ — верхня межа вимірювань (шкали) приладу (його номінальне значення).

Електровимірювальні прилади відповідно до величини їх зведеної похибки згідно з ГОСТ 23217—78 поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. За покажчиком класу точності, нанесеним на шкалу вимірювального приладу, визначають абсолютну похибку вимірювання:

$$\Delta x = \gamma_{\text{зв}} x_{\text{н}} / 100.$$

Прилади класів точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 використовуються, головним чином, для точних лабораторних вимірювань і називаються *прецизійними*; прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4 мають назву *технічних*.

Прилади магнітоелектричної системи складаються з двох основних частин: постійного магніту і котушки, що

має вигляд рамки. Принцип дії вимірювального механізму цих приладів заснований на взаємодії сильного магнітного поля постійного магніту з слабким магнітним полем рамки, по якій проходить вимірюваний струм. Схему струмовимірювача магнітоелектричної системи наведено на рис. 1. Магнітна система вимірювального механізму складається з сильного постійного магніту 4 з висококоерцитивної сталі, магнітопроводу 3, полюсних наконечників 5 і нерухомого осердя 7. Магнітопровід, полюсні наконечники і осердя виготовляються з м'яких магнітних матеріалів. Полюсні наконечники і циліндр дають змогу в малому зазорі між ними дістати однорідне радіальне магнітне поле. Між полюсними наконечниками і осердям розміщується рухома рамка (катушка) 6, що являє собою легенький алюмінієвий каркас прямокутної форми, на який намотано тонкий мідний або алюмінієвий ізольований дріт діаметром від 0,03 до 0,2 мм. З рамкою з обох боків скріплені півосі 8. Ця система забезпечує вільне обертання рамки навколо осердя, а отже, і відхилення скріпленої з нею стрілки 1 відносно шкали. Струм до рамки підводиться через затискачі 2 і дві спіральні пружини 9, які створюють протидіючий момент. При проходженні струму I через рамку на неї діє обертальний момент

$$M_1 = nBSI = k_1 I,$$

де n — кількість витків рамки; B — магнітна індукція; S — площа рамки; k_1 — коефіцієнт пропорційності. Цей момент зрівноважується протидіючим моментом деформації спіральних пружин при

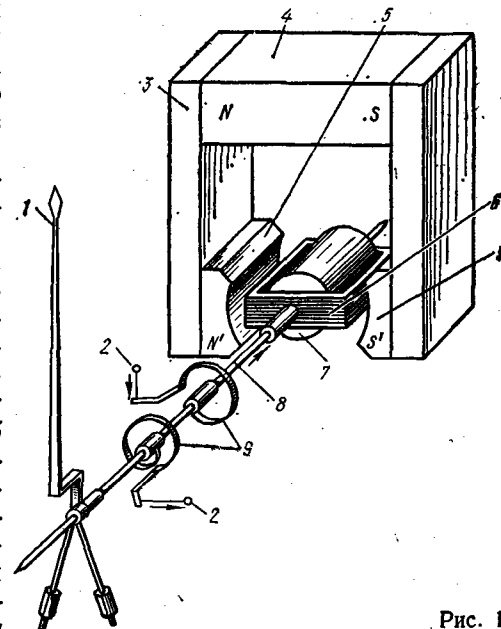


Рис. 1

повертання рамки на кут φ , тобто

$$M_2 = k_2 \varphi,$$

де k_2 — стала деформації крутіння пружини. Якщо $M_1 = M_2$, стрілка струмовимірювача фіксується на якійсь поділці шкали. Тоді $k_1 I = k_2 \varphi$, звідки

$$\varphi = \frac{k_1}{k_2} I = k I. \quad (a)$$

Отже, кут повороту рамки пропорційний силі струму. Коефіцієнт пропорційності k залежить від конструкції приладу.

З рівняння (a) безпосередньо випливає, що амперметр магнітоелектричної системи придатний для вимірювань тільки постійного струму і його шкала є рівномірною. Чутливість приладів цієї системи підвищується при збільшенні k_1 і зменшенні k_2 .

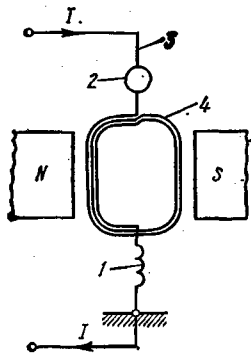


Рис. 2

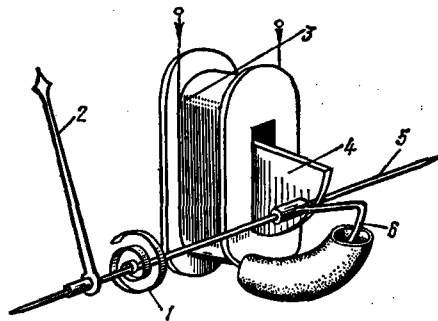


Рис. 3

Достоїнствами магнітоелектричних приладів є: висока чутливість (відомі мікроамперметри з струмом повного відхилення 0,01 мкА); можливість виготовлення високоточних приладів (класів точності 0,05; 0,1; 0,2); мале споживання електричної енергії (10^{-5} — 10^{-6} Вт у рамках і до кількох десятків вата разом із вимірювальною схемою).

Недоліки цих приладів: порівняно складна будова, чутливість до перевантажень, можливість вимірювання тільки постійних струмів. Завдяки високій чутливості магнітоелектрична система використовується для побудови гальванометрів.

Гальванометрами називають високочутливі прилади, які мають неградуйовану шкалу. Ціна поділки шкали визначається експериментально або за паспортом приладу. Діапазон вимірюваних струмів досить широкий: від 10^{-5} до 10^{-11} А. Найбільш поширеними є гальванометри магнітоелектричної системи з рухливою рамкою, наприклад, типу М21 (рис. 2). Безкаркасна рамка 4 підвішена на пружинній нитці 3. Струм I подається через металеву стрічку 1 і підвіс 3. Кут повороту рамки вимірюється оптичним методом за допомогою дзеркальця 2 і шкали. На дзеркальце від лампи спрямовують вузький світловий пучок, який після відбивання падає на шкалу з міліметровими поділками у вигляді світлового «зайчика». Шкала встановлюється на відстані 1—2 м від дзеркальця паралельно йому. При повертанні рамки і дзеркальця «зайчик» переміщується вздовж шкали.

Прилади електромагнітної системи складаються з плоскої або круглої нерухомої котушки, на яку намотаний мідний провід, і рухливого осердя, виготовленого з м'яких магнітних матеріалів (електротехнічна сталь, пермалой). Принцип дії приладів цієї системи заснований на взаємодії магнітного поля котушки, по якій проходить струм, з рухливим феромагнітним осердям (рис. 3). Вимірюваний струм I , що проходить по котушці 3, створює магнітне поле. В це поле втягується осердя у вигляді сталіної пластинки 4, закріпленої на осі 5. Намагніченість осердя і саме магнітне поле котушки пропорційні струмові, отже, обертальний момент пропорційний квадрату струму:

$$M_1 = k_1 I^2,$$

де k_1 — коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції приладу.

Протидіючий момент M_2 створюється пружинкою 1. Він пропорційний кутові повороту рухливої частини приладу:

$$M_2 = k_2 \varphi,$$

де k_2 — коефіцієнт пропорційності, який залежить від пружних властивостей пружини.

Для швидкого заспокоєння рухливої частини приладу і стрілки 1 застосовують повітряні демпфери (заспокоювачі 6). Демпфер — це камера, в якій рухається алюмінієвий поршень. При повороті осердя поршень зазнає опору повітря.

Рівновага рухливої частини приладу визначається рівністю протилежно напрямлених моментів: $M_1 = M_2$. Звідси

$$\varphi = k I^2,$$

де $k = k_1/k_2$. Отже, шкала електромагнітного приладу нерівномірна, квадратична. Із зміною напрямку струму змінюються як напрям магнітного поля, так і намагніченість осердя. Отже, прилади цієї системи застосовуються для вимірювань постійного і змінного струмів. В останньому випадку вони реагують на діюче значення змінного струму. Їх використовують також для вимірювання напруги в електричному колі. Завдяки простоті конструкції, механічній міцності і стійкості до перевантажень прилади широко застосовують у техніці. Недоліки приладів електромагнітної системи: нерівномірність шкали (частково її можна поліпшити добром певної форми осердя), менша точність порівняно з магнітоелектричними приладами, залежність показів від зовнішніх магнітних полів (через малі власні магнітні поля котушки). Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів прилади покривають металевими кожухами або виготовляють астатичними (з двома котушками, включеними послідовно; напрям обмоток і струмів дається таким, що їхні магнітні потоки стають однаковими за величиною і протилежними за напрямом).

Прилади електродинамічної системи відзначаються тим, що їхня дія ґрунтується на взаємодії магнітних полів двох котушок (рухомої й нерухомої) із вимірюваним струмом. Одна із взаємодіючих

котушок (рис. 4) 5 — нерухома і складається з двох послідовно з'єднаних котушок, між якими є зазор. В ньому розміщується вісь обертання рухомої безкаркасної котушки 4; з віссю скріплена стрілка-показчик 3 з алюмінієвою пластинкою повітряного демпфера 1. На осі також ізольовано закріплені кінці двох спіральних пружин 2, які призначені для підведення вимірюваного струму і створення протидіючого моменту. Власне магнітне поле котушок мале, тому для захисту їх від впливу зовнішніх полів застосовують екранування або прилади виготовляють астатичними.

Котушки в приладах електродинамічної системи залежно від призначення їх з'єднуються послідовно або паралельно. Якщо котушки приладу з'єднати паралельно, то його можна використовувати як амперметр (нерухома котушка при цьому виконує роль шунта). Якщо обидві котушки з'єднати послідовно і приєднати до них послідовно додатковий опір, то прилад може використовуватись як вольтметр. У ватметрах нерухома котушка вмикається в коло струму послідовно, а рухома котушка з додатковим опором — паралельно споживачам енергії.

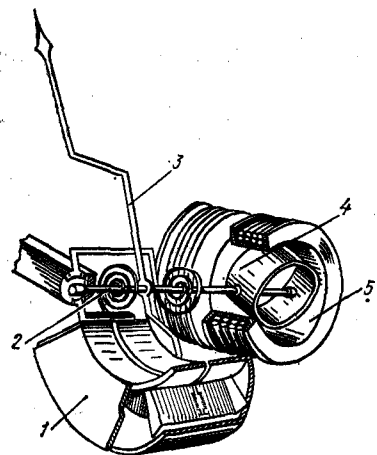


Рис. 4

У першому наближенні обертальний момент M_1 при взаємодії котушок пропорційний струмам в них I_1 і I_2 :

$$M_1 = k_1 I_1 I_2,$$

де k_1 — коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції і розміщення котушок. Протидіючий момент M_2 створюється пружинами. Він пропорційний куту повороту котушки:

$$M_2 = k_2 \varphi,$$

де k_2 — коефіцієнт пропорційності, який залежить від пружних властивостей пружин.

Якщо $M_1 = M_2$, то стрілка-показчик приладу стане в положення рівноваги. Позначивши k_2/k_1 через k , матимемо:

$$\varphi = k I_1 I_2.$$

Якщо котушки з'єднати послідовно, то $\varphi = k I^2$. Отже, шкала приладу нерівномірна. Добором конструкції котушок можна зменшити нерівномірність шкали.

Прилади електродинамічної системи мають свої переваги: їх можна застосовувати для вимірювань в колах постійного і змінного струмів, відзначаються вони високою точністю, зумовленою відсутністю в котушках металевих частин. Недоліки приладів цієї системи: низька чутливість, вплив зовнішніх магнітних полів на точність показів приладу, чутливість до перевантажень, нерівномірність шкали (крім ватметра).

Прилади індукційної системи характеризуються тим, що принцип їхньої дії ґрунтується на взаємодії вихрових індук-

ційних струмів в рухомій частині приладу (алюмінієвий диск, насаджений на вертикальну вісь) із змінними магнітними потоками нерухомих електромагнітів (один з електромагнітів має обмотку з товстого ізолюваного дроту, яка є обмоткою струму і включається в коло послідовно з навантаженням; другий електромагніт має обмотку з тонкого ізолюваного дроту, яка є обмоткою напруги і включається в коло паралельно навантаженню). Серед приладів індукційної системи широко застосовування мають лічильники електричної енергії змінного струму.

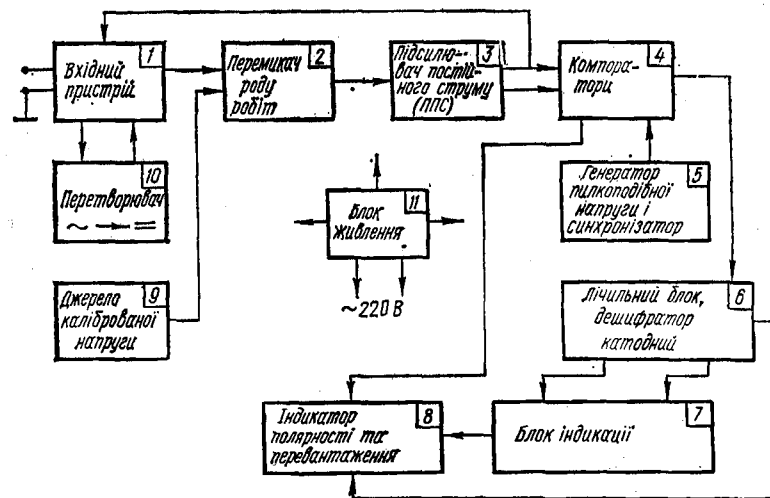


Рис. 5

Прилади електростатичної системи побудовані на принципі взаємодії рухомих і нерухомих електрично заряджених пластин. В усіх електростатичних механізмах при переміщенні рухомої частини змінюється електроємність між пластинами внаслідок зміни їх активної площі або відстані між ними. Електростатичні прилади використовуються, головним чином, для вимірювання напруги в колах постійного і змінного струмів в широкому діапазоні частот. Наприклад, вітчизняні лабораторні електростатичні вольтметри С95 класу 1,5 мають межі вимірювання від 30 В до 3 кВ. Покази їх при частоті 10 МГц відрізняються від показів при постійному струмі не більш як на 1,5 %.

Прилади електронної системи (електронні вольтметри) являють собою поєднання вимірювальної схеми, яка містить електронні лампи або напівпровідникові прилади, і вимірювального механізму магнітоелектричної або електростатичної системи. Прилади електронної системи використовуються для вимірювання в радіоелектронних схемах напруг і частот значних діапазонів. Для них характерні великі вхідні опори (1—10 МОм і більше), тому їх широко застосовують для вимірювання напруги високоомних малопотужних джерел.

Цифрові прилади невідомо величину, що вимірюється, визначають в дискретно-цифровій формі за допомогою цифрових

Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Позначення принципу дії приладу	Умовне позначення
Магнітоелектричний з рухомою рамкою	
Магнітоелектричний з рухомим магнітом	
Логометр магнітоелектричний	
Електромагнітний	
Електродинамічний	
Індукційний	
Вібраційний	
Електростатичний	
Додаткові позначення	
Термоперетворювач неізований	
Термоперетворювач ізований	
Перетворювач електронний у вимірювальній коді	
Випрямляч напівпровідниковий	
Напруга випробувальна 500 В	
Напруга випробувальна, більша за 500 В, наприклад, 2 кВ	
Посилання на відповідний документ	
Шунт	
Опір додатковий	
Екран електростатичний	
Екран магнітний	
Зажим для заземлення	
Коректор	
Клас точності в % при нормуванні похибки від межі вимірювання, наприклад, 1,5 (за ГОСТ 8.401—80)	1,5

Продовження таблиці

Позначення принципу дії приладу	Умовне позначення
Клас точності в % при нормуванні похибки від довжини шкали, наприклад, 1,5 %	1,5
Струм змінний однофазний	
Струм постійний	
Струм постійний і змінний	
Струм трифазний змінний	
Горизонтальне положення приладу	
Вертикальне положення приладу	
Положення приладу під кутом 60°	60°

Індикаторів. Цифрові прилади мають ряд переваг над звичайними, основні з яких: висока точність і швидкість вимірювання, об'єктивність і повна автоматизація процесу вимірювання, можливість передачі результатів на відстані тощо. Поряд з цим є і певні недоліки: складність схеми, порівняно великі габарити, менша надійність, ніж звичайних. Найбільш поширеними цифровими приладами є цифрові вольтметри.

Універсальні цифрові вольтметри призначені для автоматичного вимірювання сталої і змінної напруг, струму та активних опорів. Широко застосовуються в електроніці, для наукових, практичних, ремонтних і регламентних робіт та для перевірки приладів нижчого класу точності.

Спрошену структурну схему універсального цифрового вольтметра наведено на рис. 5. Вимірювана напруга постійного або змінного струму подається на входні гнізда пристрою 1. У входному пристрої постійна напруга за допомогою дільника приводиться до номінального значення (наприклад, для вольтметра В7—16 до 1 В; ВК7—10А /1 до 10 В), а далі надходить на вхід підсилювача постійного струму 3 (ППС). Змінна напруга приводиться до номінального значення, перетворюється на постійну (блок 10) і надходить до ППС. Перемикач роду робіт 2 ставиться в положення, що відповідає вимірюваній величині. Сигнал із гнізда для вимірювання активного опору R безпосередньо подається на вхід блоку ППС. Вимірювання опору здійснюється шляхом перетворення R в пропорційну напругу постійного струму. Сигнали із ППС подаються до блоку 4, що складається з двох компараторів (сигнального та нульового), кожний з яких має два входи. На перші входи компараторів подається пилоподібна напруга з блоку 5, на другий вхід сигнального компаратора подається вихідна напруга з блоку ППС (другий вхід нульового компаратора заземлений). В компараторі також формується імпульс, який подається до лічильного блока 6.

Імпульси із блока 6 надходять через спеціальний пристрій до блока індикації 7, на якому і зосереджується кінцева інформація.

Полярність постійної напруги, яка вимірюється, визначається знаком «+» або «-», який засвічується на лицьовій панелі приладу (блок 8).

При переході на вимірювання змінного струму засвічується знак «~». При перевищенні вимірюваною величиною межі вимірювання засвічується знак перевантаження «П». Залежно від положення перемикача «Род роботи» на блоці індикації 8 відповідно висвічується розмірність фізичної величини, наприклад: mV, V, Ω . Блок 9 використовується для контрольних перевірок готовності цифрового вольтметра до проведення відповідних вимірювань. Блок живлення 11 виробляє ряд напруг і забезпечує нормальну роботу всіх вузлів приладу.

Для правильної і ефективної організації електричних вимірювань слід передусім докладно ознайомитися з основними характеристиками електровимірювальних приладів на їхніх шкалах.

В таблиці на с. 14, 15 наведено деякі умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів (згідно з ГОСТ 23217—78).

1. Перевірка технічного вольтметра

Прилади і матеріали: 1) вольтметр типу Э30 або Э16; 2) зразковий вольтметр типу Э515, Э59 або АМВ; 3) реостати; 4) джерело живлення на 220 В, 50 Гц; 5) автотрансформатор РНШ-250; 6) вимикач двополюсний.

Теоретичні відомості та опис приладів

Перевірка технічного вольтметра здійснюється порівнянням його показів з показами зразкового вимірювального приладу. Для перевірки технічного вольтметра застосовують одну із схем, наведених на рис. 6, а, б або в, незалежно від того, живиться вимірювальне коло постійним чи змінним струмом.

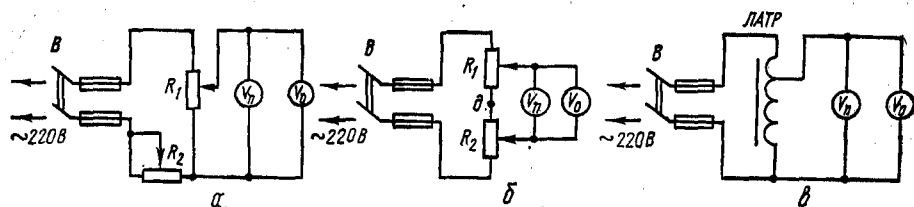


Рис. 6

Плавний характер зміни напруги під час перевірки вольтметра забезпечується застосуванням двох реостатів R_1 і R_2 . У першій схемі (рис. 6, а) реостат R_1 включений в коло як потенціометр, а реостат R_2 — послідовно як реостат. У другій схемі (рис. 6, б) обидва реостати включені послідовно і разом вони становлять потенціометр.

Співвідношення опорів реостатів $R_1 : R_2 = 10$ ($R_1 = 600—800$ Ом). Для перевірки вольтметра на змінному струмі в межах вимірювань 250 В і менше використовують схему з регулюванням напруги автотрансформатором РНШ-250 (рис. 6, в).

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з схемами вимірювань і вимірювальними приладами. Технічні дані приладів зафіксувати.

2. Скласти схему за вибраним варіантом. Після перевірки її керівником занять дістати дозвіл на виконання роботи.

3. Перед включенням схеми повзунок реостата R_1 встановити в нижнє (рис. 6, а) положення і ввести повністю опір реостата R_2 . Використовуючи другу схему (рис. 6, б), повзунки обох реостатів встановити в положення поблизу точки д'єднання цих реостатів. В таких положеннях повзунків реостатів при увімкненому джерелі живлення напруга у вимірювальне коло не подається.

4. Перевірити положення стрілок вимірювальних приладів. Вони повинні відповідати нульовим поділкам шкал. В разі потреби відрегулювати їх положення коректором.

5. Після підготовки схеми і приладів до вимірювань вимикачем подати живлення, регулюючи напругу реостатами R_1 і R_2 , послідовно встановити стрілку вольтметра, що перевіряється, на всі поділки його шкали. Покази вольтметра U_n , який перевіряється, та покази зразкового вольтметра U_z зафіксувати в таблиці. Вимірювання повторити в зворотному напрямі, зменшуючи напругу від номінальної до нуля. Грубе регулювання напруги здійснюється реостатом R_1 , а плавне — реостатом R_2 з малим опором.

6. За середнє значення показів зразкового вольтметра взяти середнє арифметичнє показів при збільшенні («хід вверх») та зменшенні («хід вниз») напруги, які відповідають тій самій цифровій позначці U_n шкали вольтметра, що перевіряється.

7. Обчислити абсолютну похибку вольтметра за формулою

$$\Delta U = U_n - U_z.$$

Зведену відносну похибку обчислити за формулою

$$\gamma_{zv} = (\Delta U / U_n) \cdot 100\%,$$

де U_n — верхня межа вимірювань вольтметра, який перевіряється.

8. Визначити клас точності приладу і порівняти його з класом точності, зазначеним на шкалі.

Контрольні запитання

1. Які основні характеристики якості електровимірювальних приладів?
2. Які основні особливості конструкцій характерні для різних систем електровимірювальних приладів?
3. Чому в схемах для перевірки технічного вольтметра застосовують два реостати?

II. Перевірка технічного амперметра

Прилади і матеріали: 1) амперметр типу М367 або М340; 2) зразковий амперметр типу М109; 3) реостати типу РПШ; 4) знижувальний трансформатор; 5) джерело е. р. с. на 6—12 В; 6) джерело живлення змінного струму на 220 В, 50 Гц; 7) вимикач двополюсний.

Перевірка показів технічного амперметра здійснюється порівнянням показів даного приладу з показами зразкового приладу A_z .

Для перевірки технічного амперметра A_z на постійному струмі застосовують схему, наведену на рис. 7, а. Як правило, точність зразкового приладу повинна перевищувати точність приладу, який перевіряється, приблизно в 3 рази. Джерелом живлення постійного струму є випрямляч на 6—12 В або акумуляторна батарея з е. р. с., що забезпечує силу струму 6 А. Для грубого і плавного регулювання сили струму

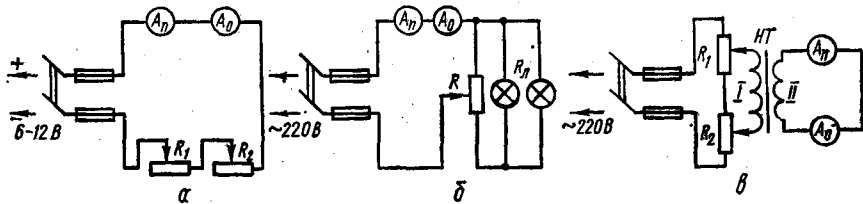


Рис. 7

застосовують два дріт'яних реостати R_1 і R_2 ($R_1 : R_2 = 4 - 8$). Величини R_{\max} і R_{\min} обчислюють за формулами: $R_{\max} = U/I_{\min}$; $R_{\min} = U/I_{\max}$ (I_{\max} і I_{\min} визначають межами вимірювальних величин приладів).

Для перевірки електромагнітного амперметра з номінальною силою струму 1, 3 і 5 А застосовують схему на змінному струмі (рис. 7, б), а для перевірки амперметра з більшою силою струму — схему з навантажувальним знижувальним трансформатором HT (рис. 7, в).

У схемі рис. 7, б ламповий реостат R_n — навантажувальний із загальною потужністю ламп 800 Вт (лампи по 50 і 100 Вт), опір реостата R становить 600—800 Ом. В схемі рис. 7, в знижувальний трансформатор повинен у вторинній обмотці забезпечити силу струму, дещо більшу за номінальну силу струму амперметра.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з схемами вимірювань і вимірювальними приладами. Технічні дані приладів зафіксувати.

2. Скласти по черзі схеми відповідних варіантів перевірки приладів. Дістати дозвіл керівника занять на виконання роботи.

3. Перед перевіркою технічного амперметра на постійному струмі при розімкнутому вимикачі ввести опори реостатів: R_1 — для грубого регулювання і R_2 — для плавного регулювання. При цьому положення стрілок вимірювальних приладів повинні відповідати нульовим поділкам шкали. В разі потреби їх положення відрегулювати коректором. Прилади попередньо прогріти протягом 15 хв.

4. Після підготовки схеми і приладів до вимірювання вимикачем подати живлення і, плавно збільшуючи силу струму, поступово вивести опори реостатів, встановлюючи стрілку амперметра A_n на всі поділки його шкали. Відповідні покази амперметрів A_n і A_z зафіксувати в таб-

лиці. Досягнувши в колі номінального значення сили струму амперметра, який перевіряється, плавно зменшити силу струму за допомогою реостатів R_1 і R_2 («хід униз»), встановлюючи стрілку A_n на тих самих поділках, що й при збільшенні сили струму («хід уверх»).

5. Порядок перевірки технічного амперметра на змінному струмі аналогічний пп. 3, 4.

6. За середнє значення показів зразкового амперметра взяти середнє арифметичне показів при збільшенні та зменшенні сили струму в колі, які відповідають тій же цифровій позначці A_n шкали амперметра, який перевіряється.

7. Обчислити абсолютну похибку амперметра за формулою

$$\Delta I = I_n - I_s.$$

Зведену відносну похибку обчислити за формулою

$$\gamma_{\text{зв}} = (\Delta I / I_n) \cdot 100 \%,$$

де I_n — верхня межа вимірювань амперметра, який перевіряється.

8. Визначити клас точності приладів і порівняти його з класом точності, зазначеним на шкалі.

Контрольні запитання

1. Поясніть процес перевірки технічного амперметра.
2. Чим визначається клас точності амперметра і які є класи точності згідно з ГОСТ 23217—78?

III. Перевірка технічного вольтметра і амперметра за допомогою універсального цифрового вольтметра

Прилади і матеріали: 1) універсальний цифровий вольтметр, наприклад, типу В7—16, В7—20, ВК7—10 А; 2) два реостати: один з опором 600—800 Ом, другий 60—80 Ом на струм не менш як 0,3 А; 3) технічний амперметр або вольтметр електромагнітної системи; 4) джерело струму, наприклад, типу ВУП, ВС-24М, РНШ-250; 5) перемикач.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися із заводською інструкцією по експлуатації приладу.

2. Розглянути функціональну схему цифрового вольтметра, з'ясувати призначення кожного блока.

3. Занести основні технічні дані приладу до робочого зошита.

4. Вивчити практично методику вимірювання напруги та струму цифровим вольтметром.

5. Скласти схему рис. 6, а, б, в або 7, б, в (за вказівкою викладача). Цифровий вольтметр у даному випадку береться за зразковий.

6. Виконати вимірювання і розрахувати похибки, як у завданнях I та II.

Контрольні запитання

1. Як підготувати вольтметр до роботи?
2. Як відбувається калібровка приладу при вимірюванні в колах постійного та змінного струмів?
3. Яке призначення органів керування, розміщених на верхній панелі приладу?
4. З якою точністю реєструвалися покази цифрового вольтметра?

IV. Розширення меж вимірювання амперметра і вольтметра

Прилади і матеріали: 1) прилад магнітоелектричної системи типу М45; 2) зразковий амперметр типу М109; 3) зразковий вольтметр типу Э59 (або АМВ); 4) джерело е. р. с. на 6—12 В; 5) джерело е. р. с. на 220—250 В (батарея або відповідний випрямляч); 6) набір шунтів і додаткових резисторів; 7) два реостати і два потенціометри (за даними завдань I і II); 8) вимикач двополюсний.

Теоретичні відомості та опис приладів

Довільний електровимірювальний прилад у процесі вимірювань не повинен змінювати своїх параметрів і режиму дій об'єкта вимірювання. Отже, опір амперметра мусить бути по можливості малим, а опір вольтметра — великим. Розширення меж вимірювання амперметрів досягається включенням паралельно амперметру шунта. Розрахунки шунта виконують за формулами

$$I = nI_0; R_{\text{ш}} = R_0/(n - 1),$$

де I_0 — сила струму повного відхилення стрілки приладу (граничний струм приладу); I — найбільше можливе значення сили струму, який повинен вимірювати прилад; n — шунтуючий множник; R_0 — внутрішній опір приладу; $R_{\text{ш}}$ — опір шунта. (Якщо опір R_0 невідомий, то його визначають згідно із законом Ома за відомим значенням сили струму I_0 і падіння напруги U_0 на затискачах приладу.) Розширення меж вимірювання вольтметрів досягається включенням послідовно до вольтметра додаткового резистора R_d . Розрахунок опору додаткового резистора R_d виконують так:

$$m = U/U_0, R = U_0I_0, R_d = R_0(m - 1),$$

де m — множник розширення меж вимірювання напруги; U — задана межа вимірювання напруги.

Шунти виготовляють з манганінових дротин або смужок, закріплених між масивними наконечниками. Їх поперечний переріз залежить від максимального струму, що проходить по шунту, який при цьому не повинен нагріватися вище допустимої температури.

Зауважимо, що основною частиною будь-якого амперметра і вольтметра постійного струму є високочутливий прилад магнітоелектричної системи.

Порядок виконання роботи

1. Для дослідження розширення меж вимірювання амперметра використовують схему завдання II (рис. 7, а), а для дослідження меж вимірювання вольтметра — схему завдання I (рис. 6, а).

2. Ознайомитися з основними характеристиками приладів, схем вимірювання. Технічні дані приладів зафіксувати.

3. Скласти по черзі відповідні робочі схеми. Дістати дозвіл керівника заняття на виконання роботи.

4. Розрахувати опір шунта $R_{\text{ш}}$ до приладу магнітоелектричної системи. Межі вимірювань сили струму задаються.

5. Ознайомитися з конструкцією шунтів, вибраних для роботи.

6. Розрахувати опір додаткового резистора R_d . Межі вимірювань напруги задаються.

7. Ознайомитися з конструкцією додаткових резисторів, вибраних для роботи.

8. Підключити шунт до клем приладу типу М45 і за схемою рис. 7, а проградуювати прилад в одиницях сили струму за зразковим амперметром.

9. Підключити додатковий резистор до приладу типу М45 і за схемою рис. 6, а проградуювати його в одиницях напруги за еталонним вольтметром.

Контрольні запитання

1. Як розрахувати шунти і опори додаткових резисторів?
2. Опишіть конструкції шунтів і додаткових резисторів.
3. Як перевірити правильність показів електровимірювальних приладів з шунтом і додатковим резистором?

V. Вимірювання малих струмів гальванометром магнітоелектричної системи

Прилади і матеріали: 1) дзеркальний гальванометр типу М21 з освітлювачем і шкалою; 2) два лужних акумулятори, з'єднані послідовно; 3) мілівольтметр типу М1151 (або М109); 4) магазини опорів типу МСР-47, Р33, Р34 (або КМС-4); 5) три однополюсні вимикачі і один перемикач.

Теоретичні відомості та опис приладів

Для аналізу схем, які містять великі опори (фотоелементи, іонні та електронні трубки), доводиться вимірювати малі струми. Вимірюють їх високочутливими гальванометрами магнітоелектричної системи. Діапазон вимірюваних струмів досить широкий — до 10^{-11} А. Схематично вимірювальну частину зображено на рис. 3. При проходженні струму по рамці виникає магнітне поле, яке взаємодіє з магнітним полем постійного магніту. В результаті взаємодії рамка повертається на скінченний кут ϕ . Для такого усталеного стану обертальний момент $M_1 = BSnI$ зрівноважується моментом закручення нитки підвісу:

$$BnSI = D\phi,$$

де B — індукція магнітного поля в зазорі магніту; n — число витків рухомої рамки; S — площа одного витка; I — сила струму, що проходить по рамці; D — модуль крутіння нитки. Звідси $I = (D/BnS)\phi$ або $I = c\phi$, де $c = D/BnS$.

Величина c називається динамічною сталою. З останньої формули випливає, що кут повороту рамки пропорційний силі струму.

Чутливістю гальванометра до струму називають величину, обернену до динамічної сталої:

$$S_I = 1/c = \phi/I = BnS/DI. \quad (1)$$

Чутливістю гальванометра до напруги називають величину

$$S_U = S_I/R, \quad (2)$$

де R — опір обмотки рухомої рамки гальванометра.

Дзеркальний гальванометр може працювати в таких режимах:
аперіодичному (характеризується плавним рухом рамки до положення рівноваги; асимптотично підходить до нього і не переходить положення рівноваги);

періодичному (рамка займає положення рівноваги після кількох затухаючих коливань);

критичному (характеризується плавним переміщенням рамки до положення рівноваги за найкоротший з усіх можливих варіантів аперіодичного руху час; цей режим найбільш вигідний при вимірюваннях).

Умови реалізації цих режимів встановимо пізніше на основі аналізу розв'язків рівняння динаміки обертального руху рамки

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \sum_{k=1}^N M_k, \quad (3)$$

де J — момент інерції системи котушка — дзеркальце; M_k — момент однієї з сил, що діють на рухому систему. Сума моментів діючих на рамку сил

$$\Sigma M_k = M_1 + M_2 + M_3,$$

тут M_1 обертальний момент взаємодії струму і магнітного поля:

$$M_1 = BSniI = \Phi_0 I,$$

де Φ_0 — загальний магнітний потік, зчеплений з котушкою; M_2 — гальмівний момент, зумовлений силами тертя і опору рамки, а також наведеною в котушці е. р. с. індукції; M_3 — момент, що виникає внаслідок реакції пружних сил з боку нитки (момент крутіння підвісу рамки):

$$M_3 = -D\varphi,$$

де D — модуль крутіння нитки.

Момент M_2 можна визначити із співвідношення

$$M_2 = -(BSni + kJ\dot{\varphi}).$$

Другий доданок у виразі для M_2 враховує сили тертя і опору повітря в рамці при її русі, та оскільки він малий, то ним можна знехтувати. Тоді

$$M_2 = -BSni,$$

де $i = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$ — струм, наведений у колі гальванометра при обертанні котушки; R — повний опір кола. Очевидно,

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} (BSn \sin \varphi) = BSn \dot{\varphi} \cos \varphi.$$

Враховуючи, що $BSn = \Phi_0$, $\cos \varphi = 1$ (кут φ — малий), маємо:

$$M_2 = -(\Phi_0^2/R) \dot{\varphi}.$$

Підставимо в (3) вирази моментів сил M_1 , M_2 і M_3 :

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{\Phi_0^2}{R} \frac{d\varphi}{dt} + D\varphi = BSni. \quad (4)$$

Рівняння (4) являє собою рівняння руху рамки гальванометра.

Введемо позначення:

$$\mu = \Phi_0^2/2RJ; \quad \omega_0 = \sqrt{D/J}; \quad \alpha = BSni/J = \Phi_0 I/J. \quad (5)$$

В урахуванням цих позначень (4) переписється так:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\mu \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi = \alpha I. \quad (6)$$

Загальний розв'язок рівняння (6) має вигляд

$$\varphi = [C_1 \exp(-(\mu - \omega)t) + C_2 \exp(-(\mu + \omega)t)] + \alpha I/\omega_0^2, \quad (7)$$

де $\omega = \sqrt{\mu^2 - \omega_0^2} = \sqrt{(\Phi_0^2/2RJ)^2 - D/J}$.

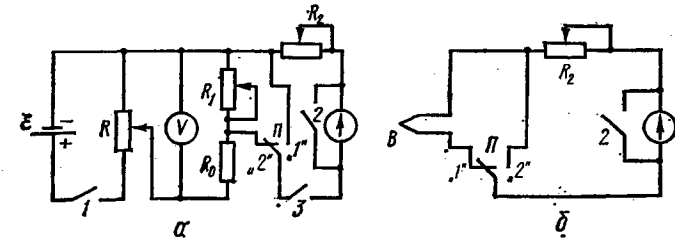


Рис. 8

При визначенні сталих інтегрування C_1 і C_2 врахуємо початкові умови. В момент часу $t = 0$ струм в колі гальванометра встановлюється досить швидко, а рамка гальванометра внаслідок інерції ще не встигає помітно зміститись відносно свого початкового положення, тобто $\varphi = \varphi_0 = 0$ і $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0 = 0$. За такої умови (7) набирає вигляду

$$\varphi = (\alpha I/\omega_0^2) [1 - (\omega_0 \exp(-\mu t)/\omega) \operatorname{Sh}(\omega t + \arctg \omega/\mu)]. \quad (8)$$

Проаналізуємо загальний розв'язок рівняння рамки.

1. Коли розглядається випадок $\mu > \omega_0$, то вираз у квадратних дужках (8) прямує до нуля. Тому обертання котушки на кут $\varphi = \alpha I/\omega_0^2$ і рух «зайчика» по екрану матимуть плавний аперіодичний характер. Це аперіодичний режим роботи.

2. Якщо виконується нерівність $\mu < \omega_0$, то розв'язки рівняння (7) є комплексними і режим роботи гальванометра буде коливальним.

3. При $\mu = \omega_0$, тобто коли згідно з (5) виконується умова

$$R = \Phi_0^2/2\sqrt{DJ}, \quad (9)$$

розв'язок рівняння (6) має вигляд $\varphi = \alpha [1 - (1 + \mu t) e^{-\mu t}] I$.

При виконанні умови (9) зовнішній опір R_s , увімкнений в коло гальванометра, має назву критичного:

$$R_{кр} = \Phi_0^2/2\sqrt{DJ} - R_s.$$

При цьому режимі роботи користуються поняттям критичної чутливості до напруги

$$S_{укр} = S_1/R_{кр}. \quad (10)$$

Коли зовнішній опір гальванометра відключений ($R = \infty$, $I = 0$), то гальванометр працює в холостому режимі. При цьому рамка

здійснює практично синусоїдні коливання з періодом

$$T_0 = 2\pi/\sqrt{D/J}.$$

Період коливань є однією з основних характеристик гальванометра.

Таким чином, той або інший режим роботи гальванометра досягається за допомогою зміни зовнішнього опору кола гальванометра R_3 , оскільки $\mu = \Phi_0^2/2RJ$. На цьому ж принципі ґрунтується і спосіб швидкого заспокоєння рухомої рамки через замикання її обмотки на коротко в момент проходження положення рівноваги.

Схему установки наведено на рис. 8, а.

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою, поданою на рис. 8, а, і встановити шкалу так, щоб світловий «зайчик» перебував на нульовій поділці шкали. На схемі 8 — батарея акумуляторів на 2,5 В, R — дільник напруги, R_1 і R_2 — магазини опорів типу Р-33 або КМС-4, R_0 — сталий опір (20 кОм).

2. Визначити *період вільних коливань* рамки гальванометра (перемикач Π в положенні «2»). Для цього встановити ручки магазинів опорів: R_2 в положення не менш як 5000 Ом, R_1 в положення не більш як 5 Ом. Замкнути вимикачі 1 і 3 і домогтися зміною опорів R_2 і R відхилення «зайчика» на всю шкалу. Розімкнути вимикач 3 та одночасно з цим включити секундомір. Визначити середнє значення періоду, вимірявши час 5—10 повних коливань рамки.

3. Визначити *внутрішній опір гальванометра, чутливість до струму та напруги*. З цією метою:

а) замкнути коло гальванометра перемикачем Π на опір R_2 (положення «1»). Замкнути вимикачі 1 і 3 і за допомогою реостата R встановити напругу на вольтметрі 0,4 В. Підключити гальванометр до джерел живлення, перемкнувши Π в положення «2». Змінюючи опір R_3 , домогтися відхилення світлового «зайчика» на 100—150 поділок шкали. Записати в заготовлену наперед таблицю значення U_1 і R_2 .

б) Збільшити напругу до 0,6 В. Змінюючи опір R_2 , добитися відхилення світлого показника на таку ж кількість поділок (!) по шкалі (100—150 поділок). Записати значення величин U_2 і R_2 .

в) Визначити із одержаних даних опір гальванометра за формулою $R_r = (U_2 R_2' - U_1 R_2)/(U_1 - U_2)$ і силу струму I_r , що проходить через гальванометр:

$$I_r = [U/(R_r + R_2)] (R_1/R_0).$$

Чутливість до струму визначається за формулою (1), в якій враховується, що кут повороту рамки дорівнює відношенню $n/2l$, де n — число міліметрових поділок відхилення шкали; l — відстань у метрах від шкали до дзеркального гальванометра:

$$S_I = n/2l.$$

Чутливість до напруги визначається за формулою (2).

4. Визначити *зовнішній критичний опір гальванометра*. Скласти схему за рис. 8, б. Короткочасне відхилення «зайчика» від положення рівноваги здійснюватиметься від термопари. Порядок виконання завдання такий. Замкнути перемикач Π в ліве положення «1» і підігріти спай термопари рукою; після відхилення покажчика шкали на 150—200 мм переключити перемикач на опір R_2 . Добираючи величину опору R_2 , досягти аперіодичного руху рамки гальванометра. Повторити дослід 3—5 разів і взяти середнє значення. Визначити чутливість до напруги за формулою (10).

5. Визначити похибки вимірювань чутливості до струму та напруги.

Контрольні запитання

1. Які є режими роботи дзеркального гальванометра? Наведіть їх характеристики.
2. Виведіть і проаналізуйте рівняння руху рамки гальванометра.
3. Поясніть будову і принцип дії гальванометра магнітоелектричної системи.

2. Моделювання електричних полів [9—15]

Електричні поля, які не змінюються з часом і створюються нерухомими зарядженими частинками, називають електростатичними.

Основними характеристиками електростатичного поля в даній точці є векторна величина \vec{E} — напруженість і скалярна величина — потенціал φ .

В електричному полі можна побудувати поверхні, які є геометричним місцем точок з однаковим потенціалом — екіпотенціальні поверхні. Екіпотенціальні поверхні і лінії напруженості є ортогональними між собою. Напруженість поля \vec{E} пов'язана з потенціалом співвідношенням

$$\vec{E} = - \text{grad } \varphi = - \frac{d\varphi}{dn} \vec{n},$$

де похідна береться по нормалі до екіпотенціальної поверхні, тобто в напрямі швидшої зміни потенціалу. Як правило, електричне поле графічно зображують так, щоб при переході від однієї екіпотенціальної поверхні до іншої приріст потенціалу був той самий. При цьому в місцях, де поверхні найближче підходять одна до одної, напруженість поля максимальна.

Робота полягає у графічному поданні картини електростатичного поля за допомогою екіпотенціальних поверхонь і ліній напруженості. Взагалі, дослідження розподілу потенціалів в електростатичному полі хоч і досить складне експериментальне завдання, однак практично виконати його можна. Вивчення електростатичного поля замінюється дослідженням стаціонарного електричного поля постійного струму між електродами в однорідному середовищі за допомогою зонда. Електропровідність середовища набагато менша, ніж електропровідність металів. Потенціали провідників підтримуються сталими. У цьому й полягає суть так званого методу модельних експериментів. Розрізняють методи *математичного* і *фізичного моделювання*. Аналогічність матема-

тичного опису процесів в оригіналі і моделі дає змогу замінити складні дослідження процесів одного явища простішим дослідженням іншого. При цьому фізична природа моделі відрізняється від оригіналу. При фізичному моделюванні модель і оригінал мають однакову фізичну природу, але різні геометричні розміри.

Той факт, що електричне поле стаціонарного струму в слабководному середовищі є потенціальним, дає змогу використати його для дослідження електростатичного поля нерухомих зарядів у вакуумі, застосувавши метод математичного моделювання.

В роботі як слабководне середовище використано в одному випадку розчин електроліту, в іншому — електропровідний папір.

I. Моделювання електростатичних полів з використанням розчину електроліту

Прилади і матеріали: 1) знижувальний трансформатор 220/6 В або випрямляч типу ВС-12; 2) ванна з діелектрика; 3) набір електродів різної форми; 4) вольтметр типу Э515 (1,5—15 В); 5) реостат на 20 Ом; 6) гальванометр вібраційний або нуль-гальванометр.

На рис. 9 наведено схему установки для моделювання електростатичного поля в розчині електроліту. На дні ванни (пунктир на рис. 9), виготовленої з електроізоляційного матеріалу (наприклад, поліметил-метакрилату) розміром приблизно $(8 \times 50 \times 50) \cdot 10^{-2}$ м, розміщують

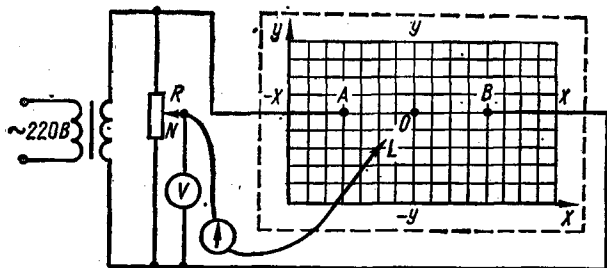


Рис. 9

міліметровий папір з нанесеною координатною сіткою, який ізолюють від попадання на нього електроліту. Металеві електроди A і B занурюють в електроліт на кінцях координатного поля ванни. Напруга подається на електроди через знижувальний трансформатор. У вимірювальну частину схеми входять також вольтметр V, потенціометр R, вібраційний гальванометр.

Рухомим контактом потенціометра можна встановити різні значення потенціалу відносно електродів. Переміщуємо зонд в електричному полі доти, поки гальванометр покаже, що потенціали в точках L і N однакові. Координати точки L знаходимо по координатній сітці ванни. При незмінному положенні рухомого контакту N переміщуємо зонд L навколо електродів і шукаємо нові точки з таким самим потенціалом.

Відмічаємо координати цих точок. Змінюючи положення контакту на потенціометрі, дістанемо сім'ю екіпотенціальних поверхонь для даної пари електродів.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 9 з циліндричними електродами.

2. Поставити зонд-щуп на відстані 2 см від одного із електродів і перемістити повзунком реостата в положення, коли через гальванометр проходить мінімальний струм. Переміщуючи зонд, визначити ряд точок, що відповідають цьому потенціалу (їх повинно бути не менш як 6—8). Координати точок занести в таблицю.

№ пор.	Φ ₁		Φ ₂		Φ ₃		Φ ₄		Φ ₅	
	x, см	y, см	x, см	y, см	x, см	y, см	x, см	y, см	x, см	y, см

3. Перемістити зонд на 1,5—2 см в напрямі другого електрода і повторити вимірювання, як у п. 2. Координати точок занести в таблицю.

4. На міліметровому папері нанести координатну сітку і накреслити систему екіпотенціальних поверхонь. Побудувати систему ліній напруженості поля. Якщо немає вібраційного гальванометра, замість трансформатора в схему включити випрямляч типу ВС-12 і скористатись звичайним нуль-гальванометром будь-якого типу.

Біля кінців кожної лінії, що відповідає певній екіпотенціальній поверхні на графіку, записати відповідні значення напруги.

5. Змінити електроди і виконати вимірювання, зазначені в пунктах 2, 3, 4.

6. Помістити у ванну між електродами металевий циліндр і дослідити поле в нових умовах.

7. Проаналізувати можливі джерела похибок.

Контрольні запитання

1. Які основні характеристики електростатичного поля? Зв'язок між ними; навіть їх одиниці.
2. Яке поле називається потенціальним? Показати, що електричне поле є потенціальним.
3. Показати, що силові лінії напруженості перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь.

II. Моделювання електростатичних полів з використанням електропровідного паперу

Прилади і матеріали: 1) джерела напруги типу ВС4-12; 2) набір планшет з різною конфігурацією електродів; 3) нуль-гальванометр типу М2031/1 або НГ-55.

Теоретичні відомості та опис приладів

Потенціали поля визначимо за допомогою зонда на поверхні електропровідного паперу. Зонд являє собою металевий щуп, який гнучким провідником з'єднаний з гальванометром.

Моделі з електропровідного паперу підключаються в електричне коло за допомогою металевих шин, роль яких виконує мідний провідник. Конфігурація шин змінюється залежно від моделі електростатичного поля. Стационарне електричне поле пов'язане з існуванням електричного струму. Тому різницю потенціалів між будь-якими двома точками можна виміряти гальванометром, який за допомогою щупів-зондів під'єднується до точок. Покази гальванометра будуть пропорційні шуканій різниці потенціалів.

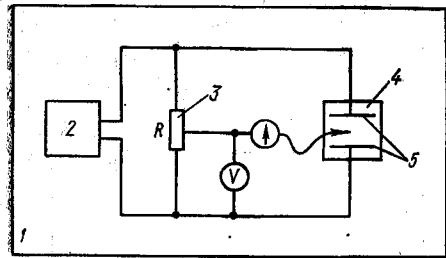


Рис. 10

Отже, за допомогою електропровідного паперу можна дістати лінії однакового потенціалу (еквіпотенціальні поверхні). Лінії напруженості електричного поля будуються як ортогональні криві до експериментально одержаних еквіпотенціальних поверхонь.

Схему експериментальної установки наведено на рис. 10. На спеціальній панелі 1 розміщено блок живлення 2, реохорд 3 і планшети 4 із змінними конфігураціями електродів 5.

Порядок виконання роботи

А. Поле утворене одним провідником.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 10.
2. Підімкнути до електродів планшети для побудови поля, утвореного одним нескінченно довгим провідником (рис. 11, a_1).
3. Поставити зонд-щуп на відстані 1—2 см від електрода і перемістити повзунок реостата в положення, коли через гальванометр проходить струм, що дорівнює нулю.
4. Щупом знайти ряд точок, для яких струм, що проходить через гальванометр, дорівнює нулю. Через ці точки провести плавну суцільну криву.

5. Збільшити за допомогою реостата потенціал на 0,5—1,0 В і повторити вимірювання п. 4.
6. Підібрати планшети для побудови еквіпотенціальних ліній (рис. 11, a_2) і повторити вимірювання пп. 3, 4, 5.
7. Побудувати лінії напруженості та еквіпотенціальні лінії поля.

Б. Поле утворене двома провідниками.

1. Підімкнути до електродів планшети для побудови поля, створюваного двома нескінченно довгими провідниками (рис. 11, b_1).
2. Повторити дії п. 3—7 частини А, скориставшись рис. 11, $b_{1,2}$.
3. Проаналізувати можливі джерела похибок.

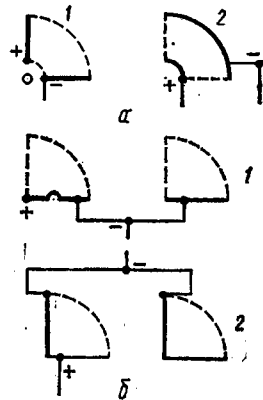


Рис. 11

Контрольні запитання

1. У чому суть методів фізичного і математичного моделювання?
2. При якій умові стаціонарне електричне поле можна використати для дослідження електричного поля?

III. Перевірка теореми Остроградського — Гаусса

Прилади і матеріали: 1) джерело постійного струму (типу ВС4-12); 2) ламповий вольтметр; 3) високоомний потенціометр типу Р-300; 4) гальванометр типу НГ-55; 5) металевий дисковий електрод; 6) поділений зонд; 7) електропровідний папір.

Теоретичні відомості та опис приладів

Метод фізичного моделювання з використанням електропровідного паперу дає змогу на моделі плоского електростатичного поля експериментально перевірити теорему Остроградського — Гаусса.

Виведемо робочу формулу на основі моделі плоского електростатичного поля, яке створюється в місці контакту металевого електрода з електропровідним папером.

Для плоского поля математичний запис теореми Остроградського — Гаусса:

$$\oint E_n h dl = q / \epsilon_0 \epsilon, \quad (1)$$

де E_n — проекція вектора напруженості \vec{E} на напрям нормалі до елемента площини; q — заряд елемента провідника висотою h (товщина електропровідного паперу, рис. 12, a); dl — елемент контура l площини; ϵ — відносна діелектрична проникність середовища.

Розглянемо проходження електричного струму через контакт двох циліндричних провідників однакового поперечного перерізу, але з різними питомими опорами ρ_1 і ρ_2 (такий контакт існує при дотику металевого циліндричного електрода до електропровідного паперу).

На основі закону Ома ($\vec{j} = \vec{E}/\rho$) з врахуванням неперервності ліній густини струму в місці дотику двох провідників дістаємо співвідношення

$$E_2/E_1 = \rho_2/\rho_1.$$

Стрибок напруженості електричного поля на поверхні відокремлення двох провідників

$$\Delta E = E_2 - E_1 = E_1 (\rho_2/\rho_1 - 1).$$

Поверхнева густина зарядів σ на поверхні відокремлення

$$\sigma = \epsilon \epsilon_0 \Delta E = \epsilon \epsilon_0 \rho_1 j (\rho_2/\rho_1 - 1).$$

У випадку контакту металу з електропровідним папером питомий опір металу $\rho_1 \ll \rho_2$ і останній вираз запишеться як

$$\sigma = \epsilon \epsilon_0 \rho_2 j.$$

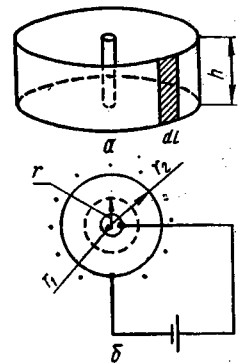


Рис. 12

Стационарний заряд, який створює поле, визначиться формулою

$$q = \epsilon \epsilon_0 \rho_2 l.$$

Підставимо цей вираз у формулу (1):

$$\oint E_n h dl = \rho_2 I. \quad (2)$$

Співвідношення (2) — це запис теореми Остроградського — Гаусса для плоского електричного поля. Спростимо цей вираз для випадку електричного поля, яке створюється мідним кільцевим електродом і електропровідним папером (рис. 12, б).

Опір електропровідного паперу визначається за формулою

$$R = \int \rho_2 dl / S.$$

Рис. 13

З урахуванням розміщення підвідних електродів матимемо:

$$R = \rho_2 \int_{r_1}^{r_2} dr / 2\pi r h = (\rho_2 / 2\pi h) \ln (r_2 / r_1).$$

Звідси $\rho_2 = 2\pi h R / \ln (r_2 / r_1)$. Підставимо цей вираз в (2) і врахуємо зв'язок між напруженістю і потенціалом:

$$\oint (U_n h / d) dl = 2\pi h I R / \ln (r_2 / r_1) = 2\pi h U / \ln (r_2 / r_1), \quad (3)$$

де d — відстань між точками, в яких вимірюється різниця потенціалів U_n ; r_1 і r_2 — радіуси центрального і кільцевого електродів; U — напруга між цими електродами. Розіб'ємо замкнений контур l на m відрізків довжиною Δl кожний. Тоді із (3) маємо:

$$(1/d) \sum_{i=1}^m U_{n_i} \Delta l_i = 2\pi U / \ln (r_2 / r_1), \quad (4)$$

де U_{n_i} — різниця потенціалів між двома точками на середині відрізка Δl_i в напрямі нормалі до цього елемента кривої; d — відстань між контактами електродів подвійного зонда. Робоча формула (4) спроститься, якщо контур, по якому проводяться вимірювання, взяти у вигляді співвісного з електродом кола (рис. 12, б) радіуса r і розбити його на m рівних частин Δl . Тоді

$$r \langle U_n \rangle / d = U / \ln (r_2 / r_1), \quad (5)$$

де $\langle U_n \rangle$ — середнє значення U_n у всій області вимірювань; r — радіус контура.

На рис. 13 наведено принципіальну схему установки.

Напруга до електропровідного паперу подається через центральний дисковий електрод 1 і кільцевий 2, який складається з двох півкільць

з невеликим проміжком між ними. Напруга вимірюється ламповим вольтметром.

Вимірювання різниці потенціалів U_n між двома сусідніми точками здійснюється за допомогою подвійного зонда 3 і приладу Р-300 [4].

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 13.
2. Зобразити на поверхні електропровідного паперу замкнений контур у формі кола, який імітує бічну поверхню циліндра.
3. Подати напругу 3 В на кільцевий і дисковий електроди.
4. Виміряти різницю потенціалів U_n в напрямі, перпендикулярно до елемента контура, не менш як 5—10 раз по всьому контуру і взяти середнє значення.
5. Перевірити рівність (5) теореми Остроградського — Гаусса.
6. Проаналізувати можливі джерела похибок.

Контрольні запитання

1. Як формулюється теорема Остроградського — Гаусса?
2. У чому особливості експериментальної перевірки теореми Остроградського — Гаусса методом фізичного моделювання з використанням електропровідного паперу?
3. Як формулюються наслідки з теореми Остроградського — Гаусса?

3. Визначення різниці потенціалів абсолютним методом [14]

Прилади і матеріали: 1) джерело високої напруги на 300 В типу ВУП; 2) абсолютний електрометр; 3) вольтметр Э515 на 75—600 В; 4) набір пластин із різних діелектриків; 5) вимикач і кнопка.

Теоретичні відомості та опис приладів

Для вимірювання потенціалу або різниці потенціалів зарядженого провідника можна використати електрометр або електростатичний вольтметр, попередньо його проградуювавши. Градування можна виконати за допомогою абсолютного електрометра, який являє собою прилад, що служить для абсолютних вимірювань різниці потенціалів шляхом експериментального визначення сили притягання між пластинами зарядженого плоского конденсатора. Плоский конденсатор, який використовується в даній роботі, являє собою систему двох металевих пластин з повітряним проміжком між ними. Для того щоб поле між пластинами було однорідним і не залежало від впливу зовнішніх електричних полів, роблять так. Верхню пластину оточують охоронним кільцем, зовнішній діаметр якого дорівнює діаметру нижньої пластини; нижню пластину поміщають на ізолюючих підставках в металевий екран циліндричної форми. Між верхньою пластиною і охоронним кільцем залишають невеликий проміжок. У такому плоскому повітряному конденсаторі «крайовими ефектами» можна знехтувати при підрахунку ємності конденсатора. Крім того, пластини конденсатора розміщують на відстані d , яка набагато менша за діаметр пластин.

Позначимо через S площу пластини, q — заряд пластин. Тоді ємність повітряного конденсатора

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/d,$$

де ϵ_0 — електрична стала системи СІ; ϵ — відносна діелектрична проникність. Сила взаємодії між пластинами плоского конденсатора $F = \epsilon_0 U^2 S / 2d^2$, звідки

$$U = d \sqrt{2F / \epsilon_0 S} = d \sqrt{2mg / \epsilon_0 S}. \quad (1)$$

Якщо простір між пластинами конденсатора заповнено діелектриком, то відносна діелектрична проникність визначається за формулою

$$\epsilon = 2Fd^2 / \epsilon_0 U^2 S. \quad (2)$$

Схему абсолютного електрометра зображено на рис. 14. Головною частиною є конденсатор, який складається з пластин A і B . Нижня

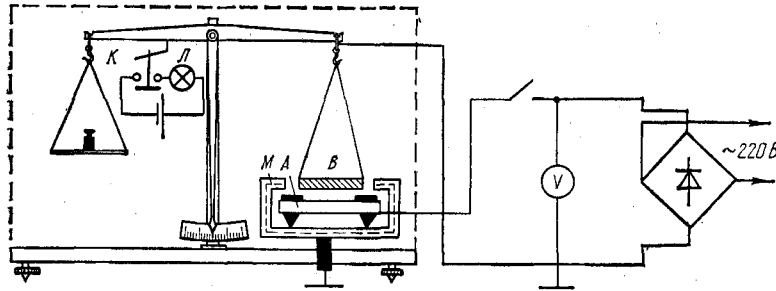


Рис. 14

пластина виготовлена з міді, верхня — з алюмінію. Верхня пластина B з охоронним кільцем M заземлюється. Нижня пластина A перебуває всередині металевого циліндра, який теж заземлюється. До нижньої пластини підмикається провідник, з'єднаний з електростатичним вольтметром або електрометром. Щоб диск B не торкався диска A , на останньому встановлено фторопластові обмежувачі товщиною 5×10^{-3} м. Діаметр нижнього диска 0,1 м, верхнього 0,06 м. Щоб коромисло не відхилялося при перевантаженні лівої шальки, на ньому змонтовано контакт K . Крім того, при підніманні коромисла вгору контакт замикається і загоряється сигнальна лампочка L від кишенькового ліхтарика. Спеціальним гвинтом регулюють вільний хід коромисла терезів.

Абсолютний електрометр виконаний на базі терезів АДВ-200.

Порядок виконання роботи

1. Визначити різницю потенціалів абсолютним методом.

1. Скласти коло за схемою рис. 14.

2. Зрівноважити терези у відсутності поля. Вагу гирок P_1 занести до таблиці.

3. Навантажити ліву шальку терезів гирками 10—15 мг і ввімкнути джерело напруги.

4. Прогрівши випрямляч, плавно підвищити напругу. Напругу збільшувати доти, поки не загориться сигнальна лампочка, що фіксує

момент замикання контактів. Записати покази вольметра. Момент замикання контактів відповідає рівності сили притягання пластинки і ваги важків. Зменшити напругу до нуля. Вимірювання виконати не менше 5 разів. Для розрахунків взяти середні значення.

5. Знову збільшити навантаження терезів на 10—15 мг і повторити вимірювання.

6. За формулою (1) обчислити різницю потенціалів.

7. Порівняти добути значення $U_{\text{абс}}$ з показами вольметра та розрахувати похибку.

Контрольні запитання

1. Як можна виміряти різницю потенціалів електрометром?
2. У чому полягає суть вимірювання потенціалу методами електричного і крапельного зондів?
3. Чому напруженість всередині конденсатора вдвоє більша за напруженість, яка створюється кожною пластиною?

4. Визначення ємності конденсаторів

[8—14, 17, заводські інструкції]

Конденсатор — це система, що складається з двох різноіменно заряджених провідників, близько розміщених один від одного. Другий провідник збігається з однією з еквіпотенціальних поверхонь поля першого. Чисельно заряди таких провідників дорівнюють один одному, але знаки їх протилежні. Самі провідники називаються обкладками конденсатора. Тоді в загальному випадку різниця потенціалів між провідниками

$$\varphi_1 - \varphi_2 = q/C,$$

де q — заряд однієї з обкладок, C — ємність.

Якщо одну із обкладок віддаляти у нескінченність, то різниця потенціалів зростатиме, а взаємна ємність зменшуватиметься і прямуватиме до ємності відокремленого провідника. Для відокремлених або симетрично розташованих провідників правильної геометричної форми в однорідному середовищі електроємність можна обчислити за їх геометричними розмірами.

Для відокремленої кулі радіуса R ємність визначається формулою

$$C = 4\pi\epsilon_0 R,$$

для сферичного конденсатора з внутрішньою сферою радіусом R_1 і зовнішньою — радіусом R_2 :

$$C = 4\pi\epsilon_0 R_1 R_2 / (R_2 - R_1),$$

для циліндричного конденсатора висотою l :

$$C = 2\pi\epsilon_0 l / \ln(R_2/R_1)$$

(можливими спотвореннями поля поблизу країв конденсатора нехтуємо).

Ємність конденсаторів здебільшого визначається експериментально. До основних експериментальних методів вимірювання можна віднести такі: метод порівняння; містковий метод; резонансний метод.

1. Визначення ємності конденсатора методом порівняння

Прилади і матеріали: 1) балістичний гальванометр, наприклад, типу ГЗБ-47; 2) випрямляч типу ВУП; 3) вольтметр магнітоелектричної системи з межею вимірювання до 150 В; 4) конденсатор з відомою ємністю $C = 0,5$ мкФ; 5) набір конденсаторів з невідомими ємностями 0,025—0,5 мкФ; 6) два перемикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Використаємо метод порівняння невідомої електроємності C з відомою електроємністю еталонного конденсатора C_0 . Для визначення заряду і електроємності використовується балістичний гальванометр.

Балістичним гальванометром називається гальванометр, призначений для вимірювання невеликої кількості електрики, що проходить через рамку протягом короткого проміжку часу (малий порівняно з періодом власних коливань рамки).

При роботі з балістичним гальванометром спостерігають не просто відхилення рухомої рамки, як у звичайному гальванометрі при проходженні постійного струму, а вимірюють максимальне відхилення рамки під дією миттєвого імпульсу струму. Для забезпечення пропорційності між максимальним відхиленням рамки і кількістю електрики потрібно, щоб імпульс струму закінчився раніше, ніж рамка гальванометра відхилиться від положення рівноваги на помітний кут. З цього випливає, що для таких вимірювань можна застосувати будь-який гальванометр магнітоелектричної системи. Але практично імпульс струму не буває настільки коротким, щоб рамка звичайного гальванометра не встигла відхилитись, поки в колі існує струм. Внаслідок цього для вимірювання короткочасних струмів треба штучно збільшувати період коливань рамки. Для цього в деяких випадках на рухому частину звичайного гальванометра прикріплюється спеціальний тягарець у вигляді металевого диска чи двох стержнів (чим збільшується момент інерції рамки).

Поряд з цим існують гальванометри, призначені лише для балістичних вимірювань. Короткочасний струм, тривалість якого τ значно менша, ніж період коливань T_0 , не встигає помітно змінити інертну рухому систему. Такий характер дії приводить до затухаючих або апериодичних коливань системи, які описуються диференціальним рівнянням, подібним до рівняння для звичайного гальванометра:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \mu \frac{d\varphi}{dt} + D\varphi = BSnl, \quad (1)$$

де J — момент інерції рамки; $\mu = \Phi_0^2/R$ — коефіцієнт опору, зумовлений гальмуванням індукційними струмами в рамці; D — модуль крутіння нитки; n — число витків рамки; R — повний опір кола (опір рамки гальванометра і опір зовнішнього кола).

Оскільки момент інерції рамки великий і вона не встигає за час τ вийти з положення рівноваги, знехтувавши в лівій частині (1) другим і третім доданками, знайдемо:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = BSnl.$$

Проінтегруємо цей вираз:

$$J \frac{d\varphi}{dt} = BSnl \int I dt = BSnlq, \quad (2)$$

де q — повна кількість електрики, яка пройшла через гальванометр. Піднесемо (2) до квадрата:

$$J^2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = B^2 S^2 n^2 q^2. \quad (3)$$

Скористаємось законом збереження і перетворення енергії і застосуємо його для випадку руху рамки:

$$W_k = \frac{J}{2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2; \quad W_n = D\varphi_{\max}^2/2,$$

тут φ_{\max} — максимальний кут повороту рамки. Оскільки $W_k = W_n$, тобто обертання рамки продовжуватиметься доти, поки вся кінетична енергія W_k набула нею, не перейде в потенціальну енергію W_n закрученої нитки підвісу, то

$$J \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = D\varphi_{\max}^2. \quad (4)$$

Поділивши (3) на (4), дістанемо:

$$J = B^2 S^2 n^2 q^2 / D\varphi_{\max}^2. \quad (5)$$

Запишемо вираз для визначення періоду вільних коливань рамки: $T_0 = 2\pi/\sqrt{D/J}$, звідки

$$J = T_0^2 D / 4\pi^2. \quad (6)$$

Прирівнявши (5) і (6), матимемо:

$$q = (T_0 D / \pi B S n) (\varphi_{\max} / 2). \quad (7)$$

Введемо позначення $T_0 D / 2\pi B S n = A$. Тоді (7) перепишеться так:

$$\varphi_{\max} = q/A. \quad (8)$$

Величина A називається балістичною сталою гальванометра. Балістична стала визначає кількість електрики, яка, пройшовши через рухому рамку, спричинить її поворот на кут 1 рад.

Отже, із (8) випливає, що максимальний кут відхилення рухомої рамки балістичного гальванометра пропорційний заряду, який пройшов через неї.

Як правило, кут повороту φ рамки гальванометра відраховується по лінійній шкалі. Тому, позначивши через N число поділок шкали, l — відстань від дзеркала гальванометра до шкали і врахувавши, що при відхиленні дзеркала на кут φ «зайчик» відхиляється на кут 2φ , запишемо:

$$\varphi_{\max} = N/2l.$$

Тепер з (8) дістанемо:

$$q = AN/2l. \quad (9)$$

За формулою (9) можна визначити кількість електрики, якщо відома балістична стала A .

Балістичну сталу практично визначають при розрядженні конденсатора з відомою ємністю C_e , зарядженого до певної різниці потенціалів U . Значення U вимірюють вольтметром високого класу точності. Тоді заряд на конденсаторі можна визначити точно:

$$q = C_e U,$$

і, отже, балістична стала

$$A = C_e U 2l / N. \quad (10)$$

Підключаючи тепер в схему замість C_e невідомої ємності, можна визначити C_x за формулою

$$C_x = BN / 2Ul = (B/U) (N/2l). \quad (11)$$

Ємність невідомого конденсатора C_x можна також визначити шляхом порівняння з конденсатором C_e при умові, що обидва конденсатори по черзі підключають в схему і заряджають до тієї самої різниці потенціалів U .

Справді, оскільки $U = \text{const}$, маємо:

$$C_x = q_x / U; \quad C_e = q_e / U, \quad C_x / C_e = q_x / q_e.$$

З (6) і (7) випливає:

$$q_e = A\varphi_e; \quad q_x = A\varphi_x; \quad q_x / q_e = \varphi_x / \varphi_e = N_x / N_e.$$

Отже, остаточно

$$C_x = C_e (N_x / N_e). \quad (12)$$

Схему вмикання приладів при виконанні роботи показано на рис. 15. Паралельно гальванометру підімкнено перемикач P_2 , призначений для заспокоєння рамки гальванометра під час її руху. В точки M — L підключаються конденсатори з відомою та невідомою ємностями. Перемикач P_1 призначено для зарядження конденсаторів (положення «1») і для розрядження їх (положення «2»).

Порядок виконання роботи

1. Визначити ємність конденсатора з твердим діелектриком.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 15, підключити еталонний конденсатор C_e (перемикач P_1 в положенні «1»). За допомогою ручки регулятора встановити напругу U_{max} на еталонному конденсаторі (до 100 В), щоб «зайчик» гальванометра зміщувався на всю шкалу.

2. Перемикач P_1 перевести в положення «2» і зробити відлік по шкалі для першого коливання. Заспокоїти рамку перемикачем P_2 . Проробити цю операцію кілька разів (не менше п'яти). Визначити середнє значення числа N . Підставити в (10) і визначити балістичну сталу A гальванометра.

3. Змінюючи напругу від 0 до U_{max} через певні інтервали і відлічуючи відхилення N «зайчика» при розрядженні конденсатора C_e , проградувати гальванометр за величиною заряду q (N). Заряд визначити за формулою (9).

4. Побудувати на основі добутих даних робочий графік $q = f(N)$.

5. Увімкнути замість C_e конденсатори невідомої ємності C_1 і C_2 . Зарядити конденсатори до різниці потенціалів $U_1 < U_{\text{max}}$. Виконати вимірювання, як в п. 2. Змінити різницю потенціалів U_2 і проробити те саме. Результати занести до таблиці.

6. Визначити за робочим графіком $q = f(N)$ заряд конденсаторів, а за формулами (11) або (12) їхню ємність. Ємності для невідомого конденсатора, обчислені при різних напругах U_1 і U_2 , мають бути близькими за абсолютними значеннями. Взяти середнє значення для кожного конденсатора.

7. Розрахувати похибку вимірювання ємності.

II. Визначити ємність двох конденсаторів при послідовному і паралельному з'єднаннях.

1. З'єднати конденсатори C_1 і C_2 спочатку послідовно, а потім паралельно і виміряти їх ємність, як зазначено в пп. 5, 6.

2. Порівняти експериментальні результати з обчисленими за формулами.

3. Оцінити похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову і принцип дії балістичного гальванометра. Чим відрізняється балістичний гальванометр від звичайного?

2. Що називають електроємністю? Одиниці вимірювання електроємності.

3. Нарисуйте схему, за якою, використовуючи балістичний гальванометр, можна здійснити вимірювання змін магнітних потоків.

II. Визначення ємності конденсатора методом містка змінного струму та резонансним методом

Прилади і матеріали: 1) універсальний міст ЕІ—2 (УМ-3) або Р556; 2) міст ЕІ—12 для вимірювання ємності та індуктивностей; 3) набір ємностей 50—1000 пФ та від 100 пкФ до 10 мкФ.

Теоретичні відомості та опис приладів

Широкого практичного застосування набули місткові методи вимірювання ємності. Вони мають ряд переваг над іншими методами, наприклад: забезпечують високу точність вимірювання; дають змогу за допомогою лише одного еталонного конденсатора вимірювати ємності, які за своїми величинами відрізняються на один-два порядки, та ін. Для підвищення точності вимірювання і одержання надійних результатів треба добре екранувати всі робочі деталі установки.

Зручним для вимірювання є метод зрівноваженого містка, принципову схему якого наведено на рис. 16.

До точок A і B підводиться напруга частотою 100—1000 Гц. У вітках AC і AD виникають відповідно струми I_1 і I_x . R_x , R_1 , R_2 , R_3 — опори, які можна підібрати так, щоб у вітці CD струму не було. В діагональ містка CD включено індикатор нуля змінного струму.

Тоді спади напруги між точками A , C і точками A , D будуть однаковими як за величиною, так і за фазою. При цих умовах у вітках AC і CB проходить струм I_1 , а у вітках AD і DB — струм I_x . Опори

R_x, R_1, R_2, R_3 можуть бути активні, реактивні (ємнісні або індуктивні) чи комплексні. Один із опорів невідомий. Можна показати, що умовами рівноваги містка є рівність між собою добутків повних опорів і сум фазових кутів між струмом і напругою протилежних плечей містка,

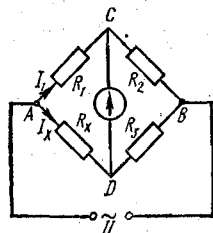


Рис. 16

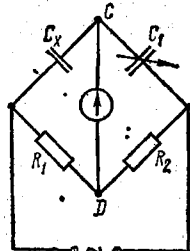


Рис. 17

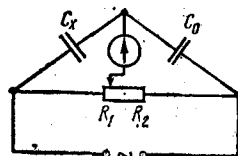


Рис. 18

тобто:

$$R_x R_2 = R_1 R_3, \quad (1)$$

$$\varphi_x + \varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_3, \quad (2)$$

де φ — зсув фаз між струмом і напругою.

Умови рівноваги для містка змінного струму, як видно, складаються з двох рівностей: (1) і (2) (на відміну від містка постійного струму).

Це пояснюється тим, що напруги на опорах R_x і R_1 повинні збігатися як за амплітудою, так і за фазою.

Умову (1) завжди можна реалізувати підбором опорів плечей містка. Виконання умови (2) залежить від правильності вибору схеми містка.

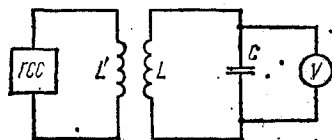


Рис. 19

На рис. 17 і 18 наведено типові схеми містків для вимірювання ємності.

В плече R_x містка включають невідому ємність C_x (рис. 17). Місток зрівноважується за допомогою зміни еталонного опору і ємності C_1 доти, поки у вітці CD не стане струму. Рівність потенціалів точок C і D можна зафіксувати вібраційним гальванометром, телефоном, ламповим вольтметром тощо.

Із (1) і (2) знаходимо робочу формулу

$$C_x = C_1 R_1 / R_2. \quad (3)$$

На рис. 18 наведено схему містка Соті, особливістю якої є застосування реохорда $R_1 R_2$ і сталої ємності (еталонний конденсатор C_0).

Для вимірювання малих ємностей застосовують резонансний метод, який забезпечує точність 2—5 %. Особливостями даного методу вимірювання є те, що коливальні контури мусять мати високу добротність і забезпечити тим самим різкий максимум на резонансній кривій. Це все потребує використання для вимірювання струмів високої частоти (сотні і тисячі кілогерц).

Застосування високочастотних струмів значно ускладнює вимірювання через значні впливи паразитних ємностей і індуктивностей. Тому всі блоки установки треба старанно екранувати.

На рис. 19 показано принципіальну схему резонансного вимірника ємностей. Генератор високочастотних коливань (ГСС) слабко зв'язаний через котушку L' з коливальним контуром невідомої ємності C . Як індикатор резонансу взято ламповий вольтметр, внутрішній опір якого великий. Для вимірювання треба мати набір еталонних котушок індуктивності. Коливальний контур складається з еталонної котушки індуктивності L і невідомої ємності C .

Зміною частоти генератора стандартних сигналів (ГСС) добиваються виникнення в коливальному контурі явища резонансу. Ємність у пікофарадах обчислюють за формулою

$$C = 25\,330 / f_0^2 L,$$

де f — частота, МГц; L — індуктивність, мкГн.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою і принципом роботи моста змінного струму УМ-3 і резонансного вимірника ємності та індуктивностей ЕІ-12.

2. Виміряти ємність кількох конденсаторів від 100 пФ до 10 мкФ містковим методом. Перевірити закони послідовного і паралельного з'єднань конденсаторів.

3. Виміряти ємність кількох конденсаторів від 50 до 1000 пФ резонансним методом. Перевірити закони послідовного і паралельного з'єднань конденсаторів.

4. Обчислити похибку вимірювання ємності.

Контрольні запитання

1. Дайте означення ємності, назвіть одиниці вимірювання ємності.
2. Поясніть будову моста змінного струму і особливості вимірювання ємностей цим методом.
3. Поясніть принцип вимірювання ємностей резонансним методом. Які особливості цього методу?
4. Виведіть формули для послідовного і паралельного з'єднання конденсаторів.

5. Вивчення діелектриків

[8—13, 16—18, 20, заводські інструкції]

Згідно з класичними уявленнями в ідеальних діелектриках немає вільних зарядів, які можуть переміщуватись по об'єму діелектрика під дією зовнішнього електричного поля. Тому вони не проводять електричний струм. Під дією зовнішнього електричного поля відбувається поляризація атомів, молекул або іонів. У результаті поляризації на поверхні діелектрика виникають так звані зв'язані, або поляризаційні, заряди, які створюють електричне поле, напрямлене протилежно до зовнішнього поля. Тому сумарне електричне поле в діелектрику послаблюється в ϵ разів. Величина ϵ називається діелектричною проникністю середовища і є основною макроскопічною характеристикою діелектрика.

Діелектрики поділяються на полярні, неполярні, іонні та сегнетоелектрики. При поляризації полярних діелектриків, таких як вода,

аміак, спирт, ефір, ацетон та ін., наявні дипольні моменти орієнтуються вздовж зовнішнього поля. Цей процес називається *орієнтаційною поляризацією*.

В середньому по часу молекули неполярних діелектриків внаслідок теплового руху можна вважати сферично симетричними відносно розподілу внутрішньомолекулярних електричних зарядів. В електричному полі центри додатних і від'ємних внутрішньомолекулярних електричних зарядів зміщуються і утворюють електричні диполі. Такий тип поляризації називають *електронною поляризацією*.

Електронна поляризація характерна для неполярних газів (азот, кисень, водень та ін.), неполярних рідин (толуол, гексан, бензол та ін.), неполярних полімерів (полістирол, поліетилен та ін.), а також для атомних і молекулярних кристалів (нафталін, сірка та ін.).

Іонна поляризація зумовлена зміщенням додатних і від'ємних іонів відносно своїх положень рівноваги. Іонна поляризація характерна для іонних кристалів, таких як галогеніди лужних металів, рутит, титанати деяких металів (наприклад, кальцію, магнію, цинку).

Окремо слід розглянути поляризацію сегнетоелектриків. Під сегнетоелектриками розуміють клас діелектриків, які мають високі значення діелектричної проникності. Сегнетоелектрики характеризуються рядом аномальних діелектричних та інших фізичних властивостей (п'єзоелектричних, електрооптичних тощо).

Це пов'язано з особливістю кристалічної будови сегнетоелектриків, коли цілі мікроскопічні області, так звані домени, можуть мати спонтанну поляризацію. Якщо немає зовнішнього електричного поля, домени поляризовані хаотично і, в цілому, електричний момент кристала сегнетоелектрика дорівнює нулю. Під дією зовнішнього електричного поля в доменах відбувається зміна напрямку поляризації і сегнетоелектрик поляризується в напрямі ліній напруженості поля.

Внутрішнє електричне поле доменів підтримує залишкову електричну поляризацію сегнетоелектрика і після зникнення зовнішнього поля.

1. Вивчення діелектричних властивостей полімерних електроізоляційних матеріалів

Прилади і матеріали: 1) вимірник добротності, наприклад, типу ИДН-1; 2) вимірювальна комірка (трьохелектродний конденсатор); 3) регулятор напруги типу РНШ-250; 4) мідь-константанова термопара; 5) потенціометр типу ПП-63; 6) вольтметр типу ЭВ15; 7) набір зразків полімерних матеріалів (поліметилметакрилат, полістирол, полівінілхлорид).

Теоретичні відомості та опис приладів

За останні 10—15 років значно розширено виробництво полімерних діелектричних матеріалів. Вибір полімерних діелектриків в кожному конкретному випадку залежить від його діелектричних та інших фізичних властивостей в широкому температурному інтервалі. Основні діелектричні властивості діелектриків характеризуються діелектричною проникністю і діелектричними втратами.

Більшість полярних і неполярних полімерів належить до ізотропних діелектриків. Для неполярних полімерних діелектриків основним

видом поляризації є деформаційна поляризація, яка не залежить від частоти зовнішнього поля. Для полярних діелектриків основним видом поляризації є дипольна орієнтаційна поляризація. Сумарна поляризація полярного діелектрика складається з деформаційної і дипольної поляризації. Тому діелектрична проникність ϵ' полярного полімера більша, ніж неполярного.

Нижче наведено значення діелектричної проникності для деяких полімерів на частоті 10^8 Гц при кімнатній температурі:

поліметилметакрилат	— 2,84
політетрафторетилен	— 2,1
полівінілхлорид	— 3,0—3,3
поліпропілен	— 2,26
полістирол	— 2,56

Якщо до конденсатора підвести змінну напругу $U = U_m \exp(i\omega t)$, то вектор струму випереджає напругу на $\pi/2$. При цьому втрат енергії немає.

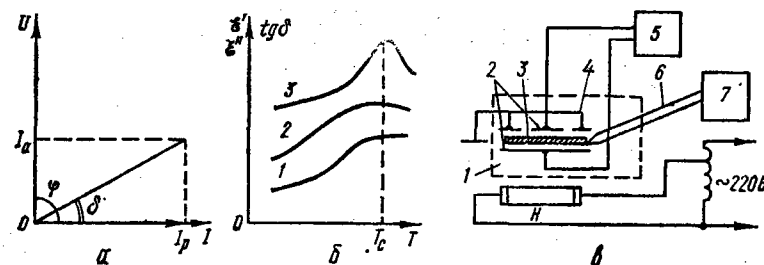


Рис. 20

При розгляді поведінки діелектрика в змінному електричному полі вводиться поняття комплексної діелектричної проникності:

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'',$$

де ϵ' — діелектрична проникність; ϵ'' — коефіцієнт діелектричних втрат, який ще має назву фактора діелектричних втрат ($i = \sqrt{-1}$). Діелектричні втрати характеризують дисипацію (розсіяння) енергії, яка виділяється в діелектрику у вигляді тепла. Розсіяння тепла пропорційне ϵ'' .

Помістимо в конденсатор із змінною напругою полімерний діелектрик. Кут між векторами струму і напруги буде вже менший за $\pi/2$ (рис. 20, а). За міру діелектричних втрат береться тангенс кута δ , який доповнює кут ϕ до $\pi/2$. Кут δ називають *кутом діелектричних втрат*, а його тангенс — *тангенсом кута діелектричних втрат*:

$$\operatorname{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon' = I_{\text{акт}}/I_{\text{реакт}},$$

де $I_{\text{акт}}$ і $I_{\text{реакт}}$ — активна і реактивна складові змінного струму.

Величина $\operatorname{tg} \delta$ чисельно дорівнює частині енергії, яка необоротно розсіюється у вигляді теплових і інших втрат за один період коливань електричного поля. Діелектричні втрати в полімерах пов'язані з поляризацією, яка виникає під впливом змінного в часі електричного поля. Особливістю дипольної поляризації полімерів є її релаксаційний

характер. Це значить, що поляризація залежить від часу дії (частоти ω) електричного поля і температури (часу релаксації диполів τ).

Так, при дуже низьких частотах ($\omega \rightarrow 0$), або, що те ж саме, при високих температурах час релаксації малий (диполі встигають орієнтуватись вздовж поля) і діелектрична проникність має максимальне значення звичайної статичної величини ϵ . Навпаки, при дуже низьких температурах, або, що те ж саме, при високих частотах теплова поляризація не встигає розвиватись, і полімер являє собою неполярний діелектрик (існує лише деформаційна поляризація). Тому діелектрична проникність ϵ при цих умовах ($\omega \rightarrow \infty$) має мінімальне значення. Експериментально встановлено, що для полімерів існують два типи діелектричних втрат: дипольно-сегментальні (при переході полімеру із склоподібного у високоеластичний стан) і дипольно-групові (зумовлені орієнтацією самих дипольних груп). На рис. 20, б схематично показано залежність від температури діелектричної проникності ϵ' (1), коефіцієнта діелектричних втрат ϵ'' (2) і тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta$ (3). Температура склування T_g відповідає переходу із склоподібного до високоеластичного стану. В даній роботі $\tan \delta$ і діелектрична проникність зразка ϵ' визначаються за допомогою куметра. Метод куметра належить до резонансних методів зміни реактивної провідності шляхом зміни ємності коливального контура. Шкала лампового вольтметра куметра проградуйована безпосередньо в одиницях добротності коливального контура. (Добротність — це кількісна характеристика резонансних властивостей коливального контура, пропорційна відношенню повного запасу енергії контура при резонансі до втрат енергії за період.)

Величини ϵ і $\tan \delta$ визначають за формулами

$$\epsilon = C_x / C_0, \quad (1)$$

$$\tan \delta = \frac{C^*}{C_x} \left(\frac{1}{Q^*} - \frac{1}{Q} \right), \quad (2)$$

де $C_x = C^* - C$ — ємність зразка; $C_0 = \epsilon_0 S/d$ — ємність вимірювальної комірки без зразка; C^* , Q^* — ємність зразкового конденсатора і добротність контура при резонансі, що відповідає ємності C^* ; C , Q — ємність конденсатора вимірювальної комірки із зразком і добротність контура при цьому.

На рис. 20, в наведено схему дослідження полімерних діелектриків. Основною частиною є вимірювальна комірка 1 з трьохелектродним конденсатором 2. Зразок 3 затискується між двома електродами циліндричної форми, виготовленими з червоної міді. Третій електрод 4 — охоронне кільце (використовується для зменшення так званого «крайового ефекту») — з'єднується провідником з корпусом приладу і заземлюється. Комірка з конденсатором кріпиться всередині трубки частотної термокамери, ніхромовий нагрівник якої живиться змінним струмом. Конденсатор 2 підмикається до куметра 5. Термопара 6 кріпиться біля зразка. Термо-е. р. с. e_T термопари вимірюється приладом 7 (типу ПП-63) з точністю $\pm 0,1$ мВ. Температура визначається з таблиць залежності е. р. с. термопари від температури. Підвищення

температури термокамери здійснюється в динамічному режимі з швидкістю 0,016 К/с. Швидкість нагрівання можна регулювати за допомогою регулятора напруги.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з заводською інструкцією куметра ИДН-1.
2. Скласти електричне коло за схемою рис. 20, в. Експериментальні результати занести до таблиці.
3. Обчислити геометричну ємність конденсатора C_0 без зразка за формулою $C_0 = \epsilon_0 S/d$ (в даній роботі діаметр пластин конденсатора $3 \cdot 10^{-2}$ м, товщина зразка $(7-10) \cdot 10^{-5}$ м вимірюються за допомогою мікрометра).
4. Провести калібровку приладу на частоті 50 кГц. Виміряти C^* і Q^* .
5. Вимірювальну комірку разом з конденсатором із досліджуваним зразком полімеру (у вигляді плівки) помістити в термокамеру.
6. Виміряти C і Q при кімнатній температурі.
7. Встановити напругу 30 В і виміряти C і Q через кожні 5—10 К до 363 К.
8. Розрахувати для кожної температури величини ϵ і $\tan \delta$ згідно з формулами (1) і (2).
9. Результати подати графічно. Пояснити знайдені залежності.

Контрольні запитання

1. Назвіть типи поляризації діелектриків.
2. Який фізичний зміст вектора поляризації і електричного зміщення?
3. Поясніть виникнення «крайового ефекту» в плоскому конденсаторі.
4. Які особливості поляризації полімерних діелектриків?

II. Визначення температури Кюрі сегнетоелектрика

Прилади і матеріали: 1) міст типу Е12—1А для вимірювання ємності; 2) автотрансформатор типу РНШ-250; 3) диференціальна мідь-константанова термопара; 4) амперметр типу Э513 до 1 А; 5) потенціометр постійного струму ПП-63; 6) полікристалічний зразок титанату барію.

Теоретичні відомості та опис приладів

Сегнетоелектричні властивості діелектриків дуже залежать від температури. При температурах, вищих за деяке певне значення, різне для різних речовин, сегнетоелектричні властивості зникають і сегнетоелектрик перетворюється на звичайний діелектрик. Ця температура називається діелектричною точкою Кюрі (на честь П. Кюрі, який ввів аналогічне поняття для феромагнетиків).

Б. М. Вул і І. М. Гольдман в Радянському Союзі відкрили сегнетоелектричні властивості у титанату барію (BaTiO_3). Точка Кюрі у титанату барію дорівнює 393 К, діелектрична проникність у максимумі досягає значення 6000. Титанат барію має високу механічну міцність, хімічно стійкий, зберігає сегнетоелектричні властивості в широкому

інтервалі температур. Він використовується як генератор і приймає ультразвукових хвиль.

На рис. 21 зображено експериментальну установку для визначення точки Кюрі титанату барію. Досліджуваний зразок 5 у формі циліндра діаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м і висотою $(2-3) \cdot 10^{-3}$ м з посрібленими поверхнями затискається між пластинами конденсатора латунними дисками 4. Поверхні дисків ретельно відполіровані і закріплені на фарфорових стержнях (на рисунку не показані). Система зразок —

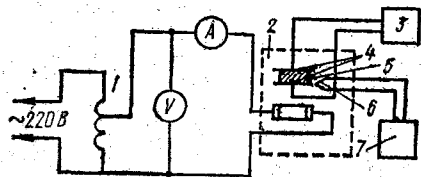


Рис. 21

сегнетоелектрик — диски являють собою плоский конденсатор, який поміщається в трубчасту піч. Швидкість нагрівання печі регулюється за допомогою регулятора 1 напруги РНШ-250 і контролюється амперметром і вольтметром. Температура зразка вимірюється з точністю до 0,2 К диференціальною термопарою 6 і потенціометром постійного струму ПП-63 (7). Ємність вимірюється мостом 3 типу Е12—1А.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 21. Конденсатор разом із зразком титанату барію помістити в піч.
2. Увімкнути прилад Е12—1А в мережу і виміряти ємність конденсатора при $T = 293$ К.
3. Ручку регулятора напруги поставити в крайнє ліве положення і після цього увімкнути його в мережу.
4. Подати напругу (50—60 В) і через кожні 10 К вимірювати ємності. Дані занести в наперед заготовлену таблицю.
5. При досягненні температури 373 К вимірювання виконати через кожні 3—5 К.
6. Побудувати графік залежності ємності від температури і визначити точку Кюрі.

Контрольні запитання

1. Що називають точкою Кюрі сегнетоелектрика?
2. Охарактеризуйте специфічні властивості сегнетоелектриків.
3. Які зміни відбуваються в структурі сегнетоелектрика при нагріванні?

6. Вивчення законів постійного струму в металах і електролітах [8—13, 16, 17]

Електричний струм — упорядкований рух електричних зарядів. У металах — це рух електронів проти поля, в електролітах — іонів різних знаків у протилежних напрямках, у газах — електронів та іонів, у напівпровідниках — електронів і дірок. Для збудження електричного струму в тілах треба створити електричне поле. Щоб струм був тривалим, енергія поля повинна підтримуватись сталою. Це здійснюється за допомогою джерел струму.

Як показує дослід, для металів густина електричного струму пропорційна напруженості електричного поля \vec{E} :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

де σ — стала для даного матеріалу величина і називається *питомою електричною провідністю* (вимірюється в сименсах на метр). Величина, обернена до питомої електричної провідності, називається *питомим електричним опором*: $\rho = 1/\sigma$ (вимірюється в омах на метр). Це один із основних законів електродинаміки — закон Ома в диференціальній формі.

З урахуванням напруженості поля сторонніх сил, які утворюють е. р. с., закон Ома записується у вигляді

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{E}_{\text{ст}}).$$

Електрорушійною силою \mathcal{E} джерела струму називають величину, яка дорівнює відношенню роботи A , що виконується сторонніми силами при переміщенні позитивного заряду вздовж усього електричного кола, включаючи джерело струму з поверненням у вихідну точку, до заряду Q :

$$\mathcal{E} = A/Q.$$

В інтегральній формі закон Ома для неоднорідної ділянки з власною е. р. с. має вигляд

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}. \quad (a)$$

Для ділянки кола без джерела е. р. с. маємо:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{або} \quad U = IR,$$

де U — електрична напруга (падіння напруги).

Для замкненого кола потенціали точок 1 і 2 однакові, тобто $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, і рівність (a) переходить в закон Ома для замкненого кола:

$$\mathcal{E} = IR,$$

де R — повний опір кола.

Закон Ома для парноіонних електролітів має вигляд

$$\vec{j} = n_0 q \alpha (u_+ + u_-) \vec{E},$$

де n_0 — концентрація іонів в розчині; q — заряд іона; α — коефіцієнт дисоціації; u_+ , u_- — рухливості додатних і від'ємних іонів; \vec{E} — напруженість зовнішнього електричного поля.

1. Перевірка закону Ома для повного кола

Прилади і матеріали: 1) акумуляторні батареї: $\mathcal{E}_1 = 6$ В, $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3 = 1,2$ В; 2) вольтметр типу З515 на 15 В; 3) амперметр типу З514 на 1—2 А; 4) два реостати до 15 Ом кожен типу РПШ-5; 5) резистор на 1—6 Ом; 6) міст постійного струму для вимірювання опорів; 7) два вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Закон Ома у формі $U = IR$ справджується лише для однорідної ділянки кола, тобто такої, на якій немає стрибків потенціалів за рахунок контактних явищ або дії електрорушійних сил.

Розглянемо неоднорідну ділянку кола 1—2 (рис. 22), на кінцях якої діє різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$. Е. р. с., що діє на даній неоднорідній ділянці кола, позначимо $\mathcal{E}_{1,2}$. Задамо напрям струму ($\varphi_1 > \varphi_2$). Тоді $\mathcal{E}_{1,2} > 0$, якщо вона діє в напрямі струму (позначено стрілкою). Скористаємось законом збереження і перетворення енергії. Оскільки провідники нерухомі, то робота dA електростатичних і сторонніх сил,

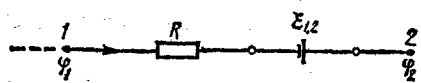


Рис. 22

яка виконується при переміщенні заряду dq на ділянці 1—2, дорівнює кількості тепла dQ , яке виділилось за час проходження заряду dq .

Тому можна записати:

$$dA = \mathcal{E}_{1,2} dq + (\varphi_1 - \varphi_2) dq,$$

$$dQ = I^2 R dt = IR dq.$$

Прирівняємо праві частини рівнянь, тоді матимемо:

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{1,2},$$

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{1,2}}{R}. \quad (1)$$

Це закон Ома для неоднорідної ділянки кола. Якщо неоднорідна частина кола складається з кількох ділянок, то формулу (1) можна узагальнити на будь-яке число ділянок:

$$I \sum_{i=1}^n R_i = (\varphi_1 - \varphi_2) + \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i, \quad (2)$$

де $\sum_{i=1}^n R_i$ — загальний опір усієї ділянки кола; $\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i$ — алгебраїчна сума е. р. с., що діють на цій ділянці.

Схему установки наведено на рис. 23. На неоднорідній ділянці АВ наявні дві е. р. с.: \mathcal{E}_2 і \mathcal{E}_3 , які ввімкнені назустріч одна одній.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 23. \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 , \mathcal{E}_3 — задані, внутрішніми опорами їх нехтуємо. Опір реостатів вимірюємо за допомогою містка, R_3 — магазин опору типу МСР.

2. Замкнути вимикач 1, потім 2. Резисторами R_1 і R_2 добитися значення сили струму 0,3 А.

3. Виміряти значення I , U , R_1 , R_2 , R_3 . Результати вимірювань занести до таблиці.

4. Обчислити величини, що вхо-

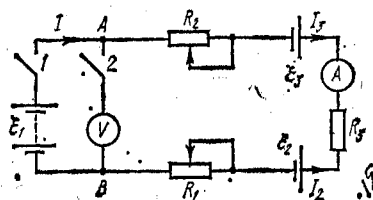


Рис. 23

дять до лівої і правої частин рівняння (2):

$$x = I(R_1 + R_2 + R_3), \quad y = U_{AB} + \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2.$$

При цьому слід врахувати знаки \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 .

5. Обчислити похибки вимірювань за класом точності вимірювальних приладів та перевірити рівність (2).

6. Зміною опорів R_1 , R_2 , R_3 підібрати в колі струм 0,35; 0,3; 0,45 А та провести обчислення згідно з пп. 3, 4, 5.

Контрольні запитання

1. За яких умов при перевірці закону Ома для неоднорідної ділянки кола можна нехтувати внутрішнім опором амперметра?
2. Чому можна нехтувати внутрішніми опорами акумуляторних батарей?
3. Вказати межі застосування закону Ома.

II. Перевірка законів Кірхгофа

Прилади і матеріали: 1) джерела струму з е. р. с. $\mathcal{E}_1 = 6$ В, $\mathcal{E}_2 = 1,3$ В, $\mathcal{E}_3 = 1,3$ В; 2) три амперметри типу Э514 до 2 А; 3) три резистори типу Р-33 до 10 Ом; 4) реостат до 20 Ом; 5) місток постійного струму для вимірювання опорів типу МВУ-49 або тестери типу Ц4312—4315; 6) два вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Розглянемо розгалужене електричне коло, в окремі ділянки якого включені джерела струму з відомими е. р. с. Розрахунок такого кола можна провести, користуючись законом Ома для неоднорідної ділянки кола і законом збереження заряду (див. завдання I). Однак завдання значно спрощується, якщо скористатися двома законами Кірхгофа, або правилами Кірхгофа, які є дальшими узагальненнями закону Ома для неоднорідної ділянки кола.

Перший закон Кірхгофа формулюється так: алгебраїчна сума струмів, які сходяться у вузловій точці, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (1)$$

Струми, які входять до вузлової точки, вважаємо додатними, а струми, які виходять з неї, — від'ємними. Наприклад, для вузлової точки С (рис. 24) на основі (1) можна записати:

$$I_0 - I_1 - I_2 = 0. \quad (2)$$

Перший закон Кірхгофа виражає закон збереження електричного заряду. Рівняння (1) можна записати для кожного із n вузлів складного кола, але незалежними будуть $n - 1$ рівняння. Другий закон Кірхгофа можна сформулювати так: у будь-якому замкненому контурі розгалуженого електричного кола алгебраїчна сума спадів напруг (тобто добутків сил струмів в окремих ділянках контура на їх опір) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють в даному контурі.

Фізичний зміст цього результату полягає в тому, що робота з переміщення заряду вздовж будь-якого замкненого контура

дорівнює тільки роботі сторонніх сил, а робота сил електростатичного поля вздовж замкнутого контура дорівнює нулю.

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа вибирають незалежні замкнені контури, які можна виділити в даному розгалуженому колі. Оскільки ліва і права частини рівняння (2) являють собою алгебраїчні суми, то умовилися вважати знак добутку $I_i R$ додатним, коли струм I_i збігається з наперед вибраним напрямом обходу контура, і від'ємним, коли напрям струму протилежний напрямові обходу. Знак е. р. с. додатний, коли напрям власного струму збігається з напрямом обходу контура.

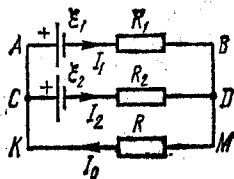


Рис. 24

Розглянемо, наприклад, складний контур на рис. 24. Застосовуючи правила Кірхгофа, можна дотримуватися такої схеми.

1. Визначити довільно напрями струмів, які входять і виходять з вузлових точок та проходять в окремих ділянках замкнутого контура.

2. Вибрати довільно напрям обходу контура і, користуючись рекомендованим вище правилом встановлення знаків доданків алгебраїчних сум, скласти шукані рівняння.

3. Складеними рівняннями охопити всі е. р. с. і всі опори даного замкнутого контура.

Застосуємо перше правило Кірхгофа до вузла D:

$$I_1 + I_2 - I_0 = 0.$$

Вибираємо напрям обходу за годинниковою стрілкою, тоді

$$\text{для контура } ABMKA: I_1 R_1 + I_0 R = -\mathcal{E}_1,$$

$$\text{для контура } ABDC A: I_1 R_1 - I_2 R_2 = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1.$$

Ці два рівняння взаємно незалежні. Для контура $CDMKC$ рівняння вже не є незалежним, воно — результат накладання двох попередніх контурів один на одний. Маємо три рівняння з трьома невідомими, і, розв'язавши систему, визначимо невідомі струми.

Мета роботи — на досліді перевірити правила Кірхгофа. Схему електричного кола наведено на рис. 25. Реостат R_0 призначено для встановлення робочої сили струму в складному електричному колі.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, наведене на рис. 25. Опори виміряти перед початком роботи, \mathcal{E}_0 , \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 відомі.

2. Ввести опір реостата R_0 повністю, замкнути вимикачі і встановити за допомогою реостата R_0 робочу силу струму 0,5—1,5 А. Зафіксувати сили струмів.

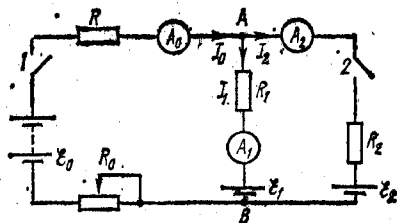


Рис. 25

3. Скласти рівняння Кірхгофа для незалежних контурів схеми на рис. 25 і обчислити струми I_0 , I_1 , I_2 .

4. Порівняти експериментально виміряні струми з одержаними на основі правил Кірхгофа. Показати, що в межах допустимих похибок результати збігаються.

5. Перевірити за показами амперметрів перше правило Кірхгофа (формула (1)) і показати, що ця формула застосовна у межах точності вимірювань.

6. Змінити напрям е. р. с. джерел \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 та сили струму і виконати обчислення, зазначені в пп. 2—5.

7. Похибки вимірювань розрахувати із врахуванням класу точності приладів.

Контрольні запитання

1. При яких умовах, розраховуючи електричні кола в даній роботі за правилами Кірхгофа, можна знехтувати внутрішніми опорами амперметрів?
2. Як формулюються перше і друге правила Кірхгофа? Який їх фізичний зміст?
3. Що означають від'ємні значення струму?
4. Які ви знаєте способи вимірювання е. р. с. джерел струму?

III. Вивчення будови акумулятора та дослідження роботи і потужності в електричному колі

Прилади і матеріали: 1) батарея акумуляторів на 6 В; 2) вольтметр з великим внутрішнім опором; 3) амперметр до 5 А типу Э514; 4) реостати: $R_0 = 2—5$ Ом, $R = 30—50$ Ом; 5) два вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Акумулятори — хімічні джерела струму, в яких віддача електричної енергії здійснюється внаслідок хімічної реакції, протилежної тій, яка відбувається при зарядженні. Основними характеристиками акумуляторів є е. р. с. \mathcal{E} , внутрішній опір r_i , максимальна потужність P_{\max} та максимальний струм I_{\max} . Для практики важливою властивістю акумуляторів є те, що їх е. р. с. може бути стабільною протягом тривалого часу.

Джерело струму розвиває повну потужність $P = I\mathcal{E}$.

Корисна потужність, яка витрачається у зовнішньому колі,

$$P_k = IU = I^2 R = I(\mathcal{E} - Ir_i). \quad (1)$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = P_k / P = I(\mathcal{E} - Ir_i) / I\mathcal{E} = (\mathcal{E} - Ir_i) / \mathcal{E} = U / \mathcal{E} \text{ або} \quad (2)$$

$$\eta = I^2 R / I^2 (R + r_i) = R / (R + r_i). \quad (3)$$

Потужність і к. к. д. акумулятора значною мірою залежать від навантаження, тобто від струму I , що проходить в колі. На рис. 26 наведено цю залежність. Графік $P_k = f(I)$ виражається відрізком параболи, вісь якої паралельна осі координат (I); тому існує екстремальна точка M на кривій $P_k = f(I)$, координати якої можна визначити із (1):

$$I_m = \mathcal{E} / 2r_i \quad \text{і} \quad P_{km} = \mathcal{E}^2 / 4r_i. \quad (4)$$

Графік $\eta = f(I)$ є спадною лінійною функцією струму (2).

З цих формул випливає, що джерело віддаватиме максимальну потужність, коли зовнішній опір дорівнює внутрішньому: $R = r_i$. У цьому випадку, як видно із (3), $\eta = 50\%$. Крім того, $\eta = 1$, коли $I = 0$. При збільшенні сили струму величина η зменшується і стає такою, що дорівнює нулю, коли зовнішній опір $R = 0$, тобто при короткому замиканні.

Для дослідження залежності корисної потужності і к. к. д. акумулятора від сили струму (навантаження) збирають схему рис. 27. Е. р. с. \mathcal{E} акумулятора вимірюють методом компенсації.

У практиці найбільш поширені *свинцеві акумулятори*, які називають також *кислотними*. Кислотний акумулятор складається із заряджених позитивно і негативно пластин, які містяться в спеціальному корпусі (можуть бути пластмасові, керамічні, скляні) з електролітом. Електроліт являє собою водний розчин сірчаної кислоти. Пластины акумуляторів — різні за будовою, наприклад, гратчасті, трубчасті. Більш поширені акумулятори з гратчастими пластинами. Гратка пластини кислотного акумулятора виливається із свинцю з домішкою сурми. Комірки гратки заповнюються пастоподібною активною масою, яка

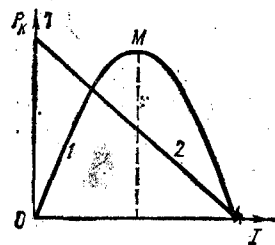
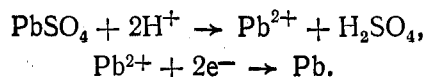


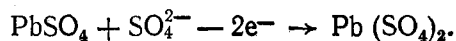
Рис. 26

виготовляється, в основному, з свинцевих оксидів: сурика Pb_3O_4 — для позитивно заряджених і глету PbO — для негативно заряджених пластин. Після заповнення пластини сушать і формують електрохімічним способом. З однотипних пластин складають півблоки, пластини в яких з'єднують паралельно, з півблоків — акумулятор. У негативно зарядженому півблоці пластин на одну більше, ніж у позитивно зарядженому, оскільки крайні пластини заряджені негативно. Зібрані блоки монтуються в корпусі і заповнюються електролітом. В результаті реакції свинцевих оксидів пластин з електролітом на пластинах утворюється шар важкорозчинного сульфату свинцю Pb_3O_4 .

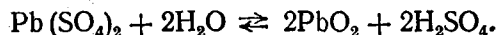
Для зарядження акумулятора через нього пропускають електричний струм. Іони водню під дією електричного поля рухаються до катода, відбувається реакція



В результаті сульфат свинцю на катоді перетворюється на губчастий металічний свинець сірого кольору. Одночасно іони SO_4^{2-} рухаються до анода, втрачають заряд і вступають в реакцію



Далі відбувається оборотна реакція:



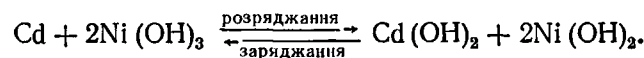
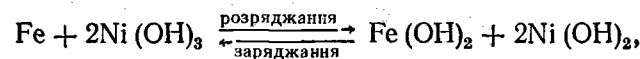
При цьому на аноді утворюється оксид свинцю (IV) темно-коричневого кольору, в електроліт виділяється сірчана кислота, а води в ньому зменшується. Густина електроліту зростає, отже, вона є характеристи-

кою ступеня розрядження акумулятора. Електрорушійна сила акумулятора в кінці зарядження може досягти значення 2,7 В. В розімкненому стані заряд акумулятора може зберігатись досить довго.

При розрядженні акумулятора відбуваються зворотні хімічні реакції з утворенням на обох пластинах сульфату свинцю. Небажано розряджати кислотний акумулятор до е. р. с. менш ніж 1,85 В.

Останнім часом широкого поширення набули *лужні акумулятори*. Спільним для всіх типів лужних акумуляторів є електроліт — 20 %-й розчин лугу у воді (звідси і походить їх назва). Залежно від хімічного складу електродів лужні акумулятори поділяються на залізо-нікелеві, кадмієво-нікелеві, цинково-нікелеві тощо. Тепер найчастіше використовують лужні залізонікелеві та кадмієво-нікелеві акумулятори. Корпуси таких акумуляторів зварюють із нікельованого заліза. Активна маса позитивно заряджених пластин (анодів) обох таких акумуляторів однакова: до зарядження — це гідроксид нікелю (II) $Ni(OH)_2$.

Схематично реакції зарядження — розрядження можна записати так:



Коли акумулятор заряджається, активна маса пластин на аноді перетворюється на гідроксид нікелю (III) $Ni(OH)_3$, а активна маса на катоді — на губчасте залізо і кадмій. При розрядженні акумуляторів відбувається зворотний процес.

Характерною особливістю лужних акумуляторів є те, що їх не розбирають протягом усього строку служби (до 10 років).

Основні переваги лужних акумуляторів над кислотними: при однаковій масі ємність їх більша; не псується при коротких замиканнях, при великих струмах; мають більшу механічну міцність; потребують меншого догляду. В свою чергу кислотні акумулятори мають вищу розрядну напругу (2—1,8 В проти 1,3—1,1 В).

Залежно від умов експлуатації в одних випадках вигідніше застосовувати лужні акумулятори, в інших — кислотні.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 27. \mathcal{E} — акумуляторна батарея; R_0 — змінний проградуйований опір 2—5 Ом — реостат, який включається між елементами батареї і призначений, по-перше, для штучного збільшення внутрішнього опору батареї, по-друге, для зменшення струму короткого замикання, що проходить через батарею, коли зовнішній опір $R = 0$.

2. Підібрати еквівалентний опір лінії так, щоб $R_0 = \mathcal{E}/I_m$, де I_m — максимальний струм, який може дати акумулятор \mathcal{E} .

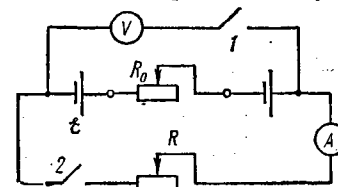


Рис. 27

3. Замкнути коло і, змінюючи його зовнішній опір реостатом, виміряти 12—15 значень струму і напруги. Початковий струм можна встановити 0,2 А.

4. Використовуючи експериментальні значення I та U , обчислити для кожного значення сили струму величини P_k і η за формулами (2), (3).

5. Побудувати на тих самих осях графіки залежності корисної потужності і к. к. д. від сили струму.

6. Збільшити опір R_0 і побудувати графіки залежності $P_k = f(I)$ і $\eta = f(I)$ (як в пп. 3—5). Проаналізувати, як змінюються положення точки M (рис. 26) і нахил прямої.

7. Обчислити похибки вимірювання величин P_k і η .

Контрольні запитання

1. Яка будова кислотних і лужних акумуляторів? Які процеси відбуваються при їх заряджанні і розряджанні?
2. Яке джерело вигідніше при експлуатації — з малим чи з великим внутрішнім опором?
3. Що таке ємність акумулятора?

IV. Визначення електрорушійної сили джерела методом компенсації

Прилади і матеріали: 1) акумулятор; 2) реохорд; 3) нульовий гальванометр типу М122, М314, М2031/1 з чутливістю 10^{-6} А/под; 4) ртутно-кадмієвий нормальний елемент; 5) набір елементів з невідомими е. р. с.; 6) реостат; 7) перемикач, вимикач, кнопка.

Теоретичні відомості та опис приладів

У кожному джерелі струму відбувається перерозподіл електричних зарядів, наприклад, в акумуляторних і гальванічних елементах відбувається перерозподіл іонів, в індукційних генераторах — перерозподіл електронів тощо.

Природа сил, які спричиняють такий перерозподіл зарядів і підтримують постійний струм у колі, різноманітна: в індукційних генераторах це електричне поле, в гальванічних елементах — хімічні реакції, при дотику двох різновидних металів — контактна різниця потенціалів і т. д. Ці сили названо сторонніми силами, а поле, яке створюється ними, — полем сторонніх сил.

Джерело сторонніх сил в колі постійного струму виконує роботу з переміщення носіїв струму проти сил електростатичного поля. Сторонні сили характеризуються роботою, яку вони здійснюють над рухомими зарядами. Величина, яка дорівнює відношенню до заряду q роботи A сторонніх сил при переміщенні позитивного заряду вздовж усього електричного кола (включається джерело струму при поверненні його у вихідну точку), називається електрорушійною силою \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = A/q.$$

Практично електрорушійну силу можна виміряти за допомогою вольтметра. Це видно із формули закону Ома для повного кола:

$$I = \mathcal{E}/R + r; \quad \mathcal{E} = IR + Ir.$$

Якщо опір вольтметра $R \gg r$, то

$$\mathcal{E} \approx IR = U,$$

і, отже, напруга, яку показує вольтметр, приблизно дорівнює е. р. с. джерела, але при умові, що внутрішній опір вольтметра дуже великий, порівняно з внутрішнім опором джерела. Тому цей метод завжди неточний.

Щоб досягти високої точності, при вимірюванні е. р. с. користуються компенсаційним методом, який зводиться до порівняння е. р. с. двох джерел. Еталонним джерелом, е. р. с. якого відома, є ртутно-кадмієвий нормальний елемент. Він складається із скляної посудини, в нижній частині якої впаяно платинові електроди (рис. 28). Позитивний полюс — ртуть, негативний — амальгама кадмію. Електролітом є насичений розчин CdSO_4 , як деполаризатор використовується сульфат ртуті Hg_2SO_4 . Е. р. с. такого

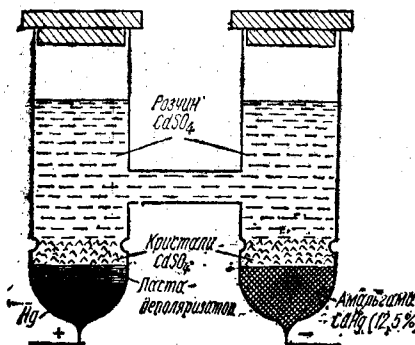


Рис. 28

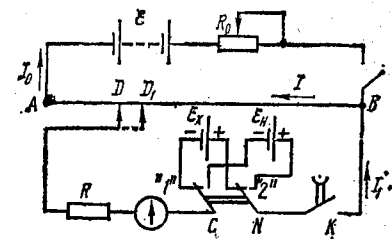


Рис. 29

елемента має високостабільне значення у межах 1,0185—1,0187 В для насичених і 1,0185—1,0195 В для ненасичених елементів, яке мало змінюється з температурою.

Для нормальних насичених елементів е. р. с. (у вольтах) при будь-якій температурі t дорівнює

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_{20} - 40,6 \cdot 10^{-6} (t - 20) - 0,95 \cdot 10^{-4} (t - 20)^2 + 0,01 \cdot 10^{-6} (t - 20),$$

де $\mathcal{E}_{20} = 1,01865$ В.

Ненасичений нормальний елемент відрізняється від насиченого лише тим, що при температурі понад 277 К вільних кристалів немає і концентрація розчину постійна. Ненасичений елемент менш стабільний, ніж насичений. Внутрішній опір нормальних елементів близько 1000 Ом.

Основною властивістю нормального елемента є його висока стабільність. Важливо, щоб елемент і вимірювані ділянки кола мали однакову температуру. Тому небажане розміщення елементів в місцях, де є великий градієнт температури, наприклад поблизу вікон, нагрівних елементів тощо. При проходженні значних струмів елемент легко поляризується і його е. р. с. стає нестабільною. Поновлення стабільності потребує значного часу. Так, наприклад, нормальний елемент часу 0,02 зберігає гарантовану точність при струмах, менших за

0,04 мкА. Для попередження перевантажень рекомендується послідовно з елементом включати захисний опір (близько 100 кОм), а вимірювання проводити при короткочасних проходженнях струму.

Принципальну схему установки зображено на рис. 29. \mathcal{E} — акумулятор, е. р. с. якого більша, ніж е. р. с. нормального \mathcal{E}_n і е. р. с. невідомого джерела \mathcal{E}_x . Акумулятор включається через реостат R_0 і замикається за допомогою вимикача на реохорд AB . Потенціал точки A менший за потенціал точки B ($\varphi_B > \varphi_A$). Отже, між кінцями реохорда AB існує різниця потенціалів, яка змінюється від 0 до U . За допомогою перемикача можна підключати до реохорда по черзі невідому е. р. с. і е. р. с. нормального елемента. Негативні полюси нормального елемента і невідомого джерела підключаються через нульовий гальванометр і опір R до рухомого контакту D реохорда AB . Нехай контакт знаходиться в точці D . Якщо різниця потенціалів в точках D і B не дорівнюватиме е. р. с. досліджуваного джерела, то в колі гальванометра з'явиться струм. Якщо ж різниця потенціалів $\varphi_B - \varphi_D = \mathcal{E}_x$, то струму в колі гальванометра не буде ($I = 0$). Знайдемо розрахункову формулу для компенсаційного методу при умові, що

$$I = I_1 = 0. \quad (1)$$

На основі законів Кірхгофа для вузла B і контура $DBNCD$ (перемикач в положенні «1») запишемо:

$$I_0 + I_1 = I, \quad I_1 R_1 + IR_{DB} = \mathcal{E}_x, \quad (2)$$

де I_1 — струм на ділянці; R_1 — опір цієї ділянки.

Використовуючи умову (1), рівняння (2) перепишемо у вигляді

$$IR_{DB} = \mathcal{E}_x.$$

Оскільки $IR_{DB} = U_{DB}$, то

$$\mathcal{E}_x = U_{DB}. \quad (3)$$

Аналогічне рівняння матимемо і для нормального елемента, коли перемикач переведемо в положення «2»:

$$\mathcal{E}_n = U_{D_1B}. \quad (4)$$

Розділимо (3) на (4):

$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_n} = \frac{U_{DB}}{U_{D_1B}} = \frac{IR_{DB}}{IR_{D_1B}}, \quad \mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n R_{DB} / R_{D_1B}.$$

Оскільки опір ділянки кола однорідної каліброваної дротини реохорда AB пропорційний її довжині, то

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n l_1 / l_2, \quad (5)$$

де $l_1 = DB$, мм; $l_2 = D_1B$, мм.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло за схемою рис. 29.

2. Замкнути коло акумулятора \mathcal{E} , а потім перемикачем (положення «2») — коло нормального елемента. За допомогою реохорда D добитися відсутності струму в колі гальванометра. Записати значення $l_2 = D_1B$. Повторити вимірювання не менше трьох разів.

Увага! Щоб нормальний елемент не поляризувався, включайте його в коло на мінімальний час, користуючись для цього кнопкою K .

3. Перемкнути перемикач в положення «1» і визначити $l_1 = DB$, як в п. 2.

4. Визначити за формулою (5) \mathcal{E}_x для кожного вимірювання і обчислити середнє значення \mathcal{E}_x .

5. Підрахувати відносну і абсолютну похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову нормального елемента і особливості його застосування в електричних колах.
2. Поясніть фізичний зміст електрорушійної сили.
3. Які сили називаються сторонніми?
4. Які є способи вимірювання е. р. с.?

V. Визначення внутрішнього опору джерела струму

Прилади і матеріали: 1) джерело струму; 2) місток Уїтстона; 3) нуль-гальванометр типу М2031/1; 4) амперметр типу 9513 або 959/3; 5) вольтметр типу 9514 або АСТ-Т; 6) реостат типу РПШ.

Теоретичні відомості та опис приладів

Метод незрівноваженого містка. Внутрішній опір джерела струму можна визначити, користуючись законом Ома для повного кола. Точніший результат буде, якщо застосувати модифікований місток Уїтстона (рис. 30) (метод незрівноваженого містка).

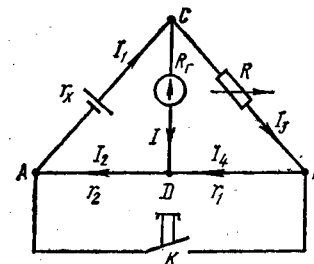


Рис. 30

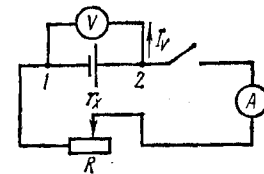


Рис. 31

Джерело струму вмикається в одне з плечей містка Уїтстона (наприклад, AC). Змінюється положення контакту D на реохорді або змінюється опір R при нерухомому контакті D доти, поки струм через нуль-гальванометр не буде змінюватись як при замкненій, так і при розімкненій кнопці K . Виконання цієї умови означатиме, що струм в діагоналі CD не залежить від опору діагоналі AB , це є так званий «хибний нуль».

Розглянемо теоретичні основи методу. Складемо рівняння Кірхгофа для даного кола:

$$\begin{aligned} \text{для контура } ACDA: I_1 R_x + IR_p + I_2 R_2 &= \mathcal{E}, \\ \text{для контура } CBDC: I_3 R + I_4 R_1 - IR_p &= 0, \\ \text{для вузла } C: I_1 - I - I_3 &= 0, \\ \text{для вузла } D: I - I_2 + I_4 &= 0. \end{aligned}$$

(1)

При замиканні ключа опір діагоналі AC змінюється. Позначимо струми в плечах містка так: $I_1 + \Delta I_1$; $I_2 + \Delta I_2$; $I_3 + \Delta I_3$; $I_4 + \Delta I_4$. Струм, який проходить через нуль-гальванометр, за умовою не змінюється, тому $\Delta I = 0$. Для нових значень струму можна скласти рівняння Кірхгофа і розв'язати їх разом з рівняннями (1). Дістанемо:

$$\Delta I_1 r_x + \Delta I_2 r_2 = 0,$$

$$\Delta I_3 R + \Delta I_4 r_1 = 0,$$

$$\Delta I_1 = \Delta I_3,$$

$$\Delta I_2 = \Delta I_4.$$

Тоді $\Delta I_1 r_x = -\Delta I_2 r_2$; $\Delta I_1 R = -\Delta I_2 r_1$. Звідси маємо: $r_x = R r_2 / r_1$ або для реохорда

$$r_x = R l_2 / l_1, \quad (2)$$

де l_1 і l_2 — довжини ділянок реохорда AD і DB .

Метод амперметра і вольтметра менш точний, але відрізняється простотою. Розглянемо схему рис. 31. Запишемо закон Ома для ділянки 1—2:

$$I r_x = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E},$$

де φ_1 , φ_2 — потенціали точок 1 і 2. Оскільки $\varphi_1 - \varphi_2 = U$, де U — напруга, яку показує вольтметр, то попередній вираз переписеться у вигляді

$$I r_x = \mathcal{E} - U. \quad (3)$$

Зменшимо струм у колі до значення I_1 :

$$I_1 r_x = \mathcal{E} - U. \quad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) маємо

$$r_x = (U_1 - U) / (I - I_1). \quad (5)$$

Цей метод дає задовільні результати для джерел з великим внутрішнім опором. При невеликих значеннях струму треба враховувати струм, що споживається вольтметром.

Порядок виконання роботи

1. Визначити внутрішній опір методом незрівноваженого містка.

1. Скласти схему згідно з рис. 30.

2. Поставити повзунок реохорда D посередині шкали. Зміною опору R добитися того, щоб замикання або розмикання кнопки K не впливало на величину струму, що проходить через нуль-гальванометр (так званий «хибний нуль»).

3. Обчислити внутрішній опір джерела r_x (оскільки $l_1 = l_2$, то $r_1 = R$).

4. Зміною положення повзунка «хибного нуля» виставити на магнітині опорів опір, близький до знайденого в п. 2, 3.

5. Вимірювання провести не менш як 3 рази. Дані занести до таблиці.

6. Обчислити похибку вимірювання.

II. Визначити внутрішній опір методом амперметра і вольтметра.

1. Скласти коло за схемою рис. 31.

2. Визначити внутрішній опір невідомого джерела e . р. в. за формулою (5).

3. Здобуті результати порівняти з результатами, одержаними методом незрівноваженого містка.

4. Розрахувати похибку вимірювання з врахуванням класу точності приладів.

Контрольні запитання

1. Назвіть способи вимірювання опору джерела струму, їх переваги і недоліки.

2. У чому полягає суть методу незрівноваженого містка для вимірювання внутрішнього опору?

3. У чому суть правил Кірхгофа?

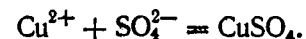
VI. Дослідження законів електролізу та визначення заряду одновалентного іона

Прилади та матеріали: 1) джерело напруги типу BC4—12 з фільтром; 2) електролітична ванна з 10%-м розчином мідного купоросу; 3) амперметр типу З514 або М104, М109 до 2,5 А; 4) реостати до 20 Ом; 5) секундомір; 6) терези типу АДВ-200; 7) вимикач.

Теоретичні відомості та опис приладів

Електролізом називається явище розкладання електроліту на складові частини під дією електричного струму. При проходженні струму через електроліти іони переміщуються до електродів, розряджаються і виділяються на них. Як правило, ці продукти вступають у вторинні хімічні реакції з електродами або розчинником.

Опустимо в розчин мідного купоросу мідні електроди і підключимо їх до полюсів джерела струму. Іони Cu^{2+} рухатимуться до катода і на ньому виділятиметься чиста мідь. Іони SO_4^{2-} , втративши заряд на аноді, вступають у хімічну взаємодію:



Таким чином, концентрація розчину, як видно, не змінюється. В результаті електролізу мідь переноситься з анода на катод.

Кількісні закони електролізу відкрив у 1833 р. М. Фарадей. Згідно з першим законом Фарадея,

$$m = Aq / N_A Z e,$$

де m — маса речовини, яка виділяється на катоді при проходженні заряду; A — атомна маса елемента; N_A — число Авогадро; Z — валентність; e — заряд електрона.

Величина $A / N_A Z e$ є сталою для кожної речовини і називається електрохімічним еквівалентом k :

$$k = A / N_A Z e. \quad (1)$$

Тоді

$$m = kq = kIt. \quad (2)$$

Значення електрохімічного еквівалента найбільше для одновалентного іона.

Другий закон Фарадея твердить, що маса речовини, яка виділилась на електроді, пропорційна хімічному еквіваленту (A/z). Отже, обидва закони можна записати так:

$$m = Aq/FZ, \quad (3)$$

де F — число Фарадея.

Число Фарадея можна також визначити із формули

$$F = A/Zk. \quad (4)$$

На рис. 32 наведено схему установки для визначення електрохі-

мічного еквівалента міді, числа Фарадея і заряду електрона. В пластмасову електролітичну ванну, заповнену 10 %-м розчином CuSO_4 , поміщають мідні електроди: анод A і катод K . Для забезпечення в розчині робочої сили струму 1—1,5 А катод розміщують між двома пластинками, які з'єднані між собою і підключені до позитивного полюса джерела струму.

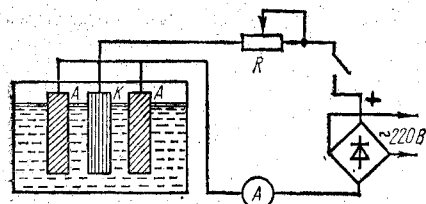


Рис. 32

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 32. Замкнути коло. За допомогою реостата R встановити робочу силу струму. Розімкнути коло.

2. Ретельно очистити електрод, промити, висушити і зважити з точністю до 10^{-3} г.

3. Встановити електрод на місце в електролітичну ванну. Одночасно з вмиканням кола пустити секундомір.

4. Струм підтримувати сталим за допомогою реостата протягом 30—40 хв.

5. Вимкнути одночасно електричне коло і секундомір. Висушити і зважити катод. Різниця мас катода після і до електролізу дорівнює масі m міді, що виділяється на катоді за час проходження струму.

6. Обчислити за формулою (2) електрохімічний еквівалент міді.

7. Обчислити за формулою (4) число Фарадея.

8. За співвідношенням (1) визначити заряд електрона, взявши для міді $Z = 2$.

9. Розрахувати абсолютні і відносні похибки результатів, одержаних у пп. 6, 7, 8, та порівняти їх з табличними даними.

Контрольні запитання

1. Який фізичний зміст числа Фарадея?
2. Чи можна використовувати як джерело струму випрямляч без фільтра?
3. Навести приклади електролізу.
4. Які ще існують методи визначення заряду електрона?

7. Вимірювання опорів і визначення їх температурної залежності [8—14, 16—19, заводські інструкції]

Електричний опір ділянки кола — величина, яка чисельно дорівнює відношенню напруги на кінцях цієї ділянки до сили струму в ній. Для постійного струму електричний опір називається активним. Він залежить від матеріалу провідника, його розмірів і форми.

Для однорідного провідника із сталим поперечним перерізом S довжиною l

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де ρ — питомий опір провідника.

Для неоднорідного провідника опір можна обчислити за формулою

$$R = \int_1^2 \rho \frac{dl}{S}.$$

Електричний опір металів істотно залежить від температури. Взагалі, ця залежність має складний характер, але якщо розглядати обмежені інтервали температур, то можна записати для опору і питомого опору залежності:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)];$$

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (t - t_0)], \quad (a)$$

де R_0, ρ_0 — значення опору і питомого опору при температурі $t = 0^\circ\text{C}$; R, ρ — опір і питомий опір при температурі t ; α — температурний коефіцієнт опору, який є сталим лише для невеликих температурних інтервалів. Для більш широких температурних інтервалів температурний коефіцієнт α залежить від температури. Тому треба користуватися розкладанням в ряд

$$R = R_0 [1 + \alpha_1 (t - t_0) + \alpha_2 (t - t_0)^2 + \dots],$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ — степеневі температурні коефіцієнти опору. Середнє значення температурного коефіцієнта опору в невеликому інтервалі температур визначається як

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 (t - t_0)}. \quad (б)$$

Взявши безмежно малі інтервали температур, дістанемо точне значення:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dt}. \quad (в)$$

На графіку залежності α від температури похідна виражає значення кутового коефіцієнта дотичної, проведеної через дану точку кривої. Тому графічно, користуючись (б), можна досить легко визначити температурний коефіцієнт при даній температурі.

Для вимірювання електричного опору скористаємось методом порівняння за допомогою місткових схем. Місткові методи

вимірювання параметрів електричних кіл широко застосовуються у вимірювальній техніці. Ці методи дають змогу вимірювати опори з високою точністю. Точність зумовлена застосуванням змінних зразкових мір опору, з якими порівнюються невідомі опори. Місткова схема може мати вигляд чотириполюсника (рис. 33, а). На одні клемми подається напруга живлення, а на вихідних клеммах дістаємо різницю струмів або напруг, яка залежить від параметрів схеми. Для вимірювання опорів застосовуються *одинарні* (чотириплечі типу Р333, МВУ-49, МОД-62, МО-47) або *подвійні* (наприклад, Р329, МОД-62) *мости* постійного струму. Одинарні мости, як правило, застосовуються для

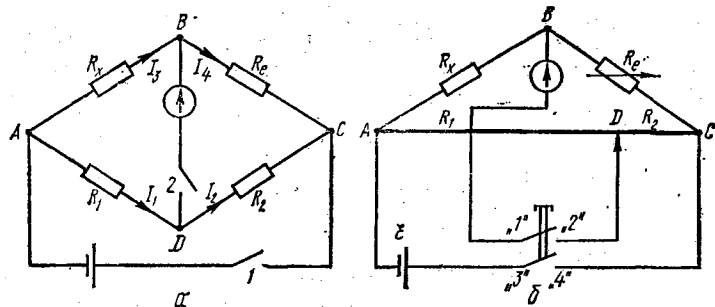


Рис. 33

вимірювання відносно великих опорів, порядку $1-10^6$ Ом, точність вимірювання може досягати 0,001 %.

Подвійні мости застосовуються для вимірювання малих опорів (менш як 1 Ом). Це тому, що при вимірюванні малих опорів одинарним мостом виникають великі похибки внаслідок впливу опорів підвідних провідників. За допомогою подвійних містків можна вимірювати опори до 10^{-6} Ом.

Для практичного вимірювання опорів застосовуються також прилади: омметри, мегомметри, тераомметри.

1. Визначення великих та малих опорів за допомогою місткових схем

Прилади і матеріали: 1) акумуляторна батарея; 2) мости типу Р329 або МОД-62; 3) реохорд; 4) набір шуканих опорів; 5) магазин опорів типу МСР-60; 6) нуль-гальванометр типу М2031/1; 7) перемикач.

Теоретичні відомості та опис приладів

Зручною і поширеною містковою схемою є схема *містка Уітстона* (рис. 33, а). В чотириплечий контур $ABCD$ включено опори R_1 , R_2 , R_x , R_e , які утворюють так звані плечі містка. Протилежні вершини чотирикутника з'єднують діагоналями, до однієї з яких підімкнено гальванометр, до другої — джерело струму \mathcal{E} .

Якщо вимикач 1 замкнений, а 2 — розімкнений, то по ділянках ABC і ADC проходять струми

$$I_3 = I_4 = \mathcal{E} / (R_x + R_e),$$

$$I_1 = I_2 = \mathcal{E} / (R_1 + R_2).$$

Спади напруг на опорах R_x і R_1 відповідно дорівнюватимуть

$$U_x = I_3 R_x = \mathcal{E} R_x / (R_x + R_e),$$

$$U_1 = I_1 R_1 = \mathcal{E} R_1 / (R_1 + R_2).$$

При будь-яких значеннях опорів їх завжди можна підібрати так, що виконуватиметься рівність

$$R_x / (R_x + R_e) = R_1 / (R_1 + R_2).$$

Отже, при замиканні 2 струм через гальванометр не проходитьиме ($U_x = U_1$, і потенціали точок B і D однакові). Скориставшись властивостями пропорцій, маємо:

$$R_x / R_e = R_1 / R_2 \quad \text{або} \quad R_x = R_e R_1 / R_2.$$

Ділянка ABC з опором R_e називається *плечем порівняння*, а ділянки з опорами R_1 і R_2 — *плечами відношення*.

Рівновага моста настає тоді, коли відношення опорів попарно взятих плечей, з'єднаних з кінцями відповідної діагоналі містка, дорівнюють одне одному.

Метод вимірювання опорів за допомогою містка Уітстона називається ще *методом порівняння*, або *нульовим методом*.

Поділивши почленно останні рівності, дістанемо умову рівноваги містка:

$$R_1 / R_2 = R_x / R_e.$$

Залежно від конструкції розрізняють *магазинні* і *реохордні містки Уітстона*. У перших опори R_1 , R_2 , R_e являють собою магазинні опори. Можна використати, наприклад, магазинні опори типу МСР-60, КМС-4, похибка яких не перевищує $\pm 0,5$ %. В реохордних містках (рис. 33, б) ділянка AC являє собою нікеліновий або виготовлений з іншого матеріалу провідник, натягнутий вздовж лінійки із шкалою (реохорд). AD — опір R_1 , DC — опір R_2 . Переміщуючи рухомий контакт D , змінюємо відношення R_1 / R_2 . Оскільки провід однорідний, то можна замінити відношення опорів відношенням довжин:

$$R_1 / R_2 = l_1 / l_2.$$

В плече AB включається невідомий опір R_x , а в плече BC еталонний опір (магазин опорів). Робоча формула матиме вигляд

$$R_x = R_e l_1 / l_2. \quad (1)$$

Схему вмикають через подвійну кнопку, яка конструктивно виготовлена так, що спочатку вмикається джерело, а потім гальванометр. При такому вмиканні індуковані екстраструми замикання і розмикання не викликають різкого відхилення стрілки гальванометра.

Точність вимірювання опорів містком Уітстона визначається точністю, з якою виготовлено відомі опори, граничною чутливістю гальванометра, точністю регулювання і відліку відомих опорів.

Так, якщо точність відліку положення рухомого контакту D дорівнює Δl , то похибка, яка вноситься при цьому у значення невідомого опору R_x , дорівнює:

$$\Delta R_x / R_x = L \cdot \Delta l / l_1 l_2, \quad (2)$$

де L — довжина реохорда. Якщо опір малий (близько 1 Ом), то точність вимірювання містком Уітстона обмежується впливом перехідних опорів контактів провідників, опорів самих провідників, будь-якими змінами чистоти поверхні реохорда, зміною площини поверхні рухомого контакту та ін.

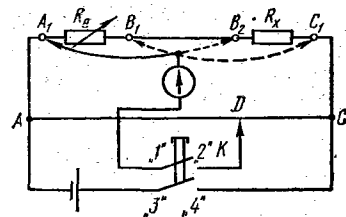


Рис. 34

Для зменшення впливу таких факторів при вимірюванні малих опорів застосовується удосконалена схема містка Уітстона, в якій підвідні провідники виготовляють з матеріалу, що має великий питомий опір (константан, залізо, нікелін тощо).

Принципіальну схему містка наведено на рис. 34. AA_1 ; B_1B_2 ; C_1C — підвідні провідники з великим опором. Один кінець гальванометра через ключ з'єднаний з рухомим контактом реохорда D , другий — з шнуром, який може легко підмикатись до точок A_1 , B_1 , B_2 , C_1 .

Розрахункова формула для містка матиме вигляд

$$R_x = R_e \frac{I_{B_1} - I_{A_1}}{I_{C_1} - I_{B_1}}. \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти містком Уітстона великий опір.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 33, б.
2. Встановити рухомий контакт D посередині реохордної лінійки.
3. Замкнути на короткий час кнопку.
4. Зменшуючи або збільшуючи опір еталонного магазину, добитися того, щоб стрілка гальванометра відхилялась вліво або вправо в межах шкали. Рухомим контактом D добитися того, щоб струм через гальванометр не проходив (стрілка не відхилялася). Записати до таблиці опір магазину і довжини плечей реохорда.

5. Вимірювання повторити 3—5 разів, щоразу змінюючи опір еталонного магазину на 5—10 % попереднього значення.

6. Підрахувати невідомий опір за формулою (1).

7. Обчислити похибку вимірювання за формулою (2).

II. Виміряти містком Уітстона малий опір.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 34.
2. Встановити щуп гальванометра в точку B_1 , а рухомий контакт D встановити на $1/3$ шкали реохордної лінійки.

3. Замкнути короткочасно кнопку та, змінюючи еталонний опір, добитися, щоб стрілка гальванометра відхилялася вліво або вправо в межах шкали.

4. Встановити щуп в гніздо A_1 . Рухомим контактом D добитися, щоб стрілка гальванометра не відхилялася. Записати в таблицю опір R_e і довжини плечей реохорда.

5. По черзі встановити щуп в гнізда B_1 , B_2 , C_1 та повторити операції п. 4.

6. Повторити вимірювання 3—5 разів.

7. Розрахувати опір R_x за формулою (3).

8. Обчислити похибку вимірювання.

III. Виміряти малий та великий опори одинарно-подвійним містком.

1. Вивчити заводську інструкцію до одного із типів одинарно-подвійного моста, наприклад, типу Р329 або МОД-62.

2. Провести вимірювання невідомих опорів R_x відповідно до завдань I і II.

3. Зробити висновки та обчислити абсолютну і відносну похибки, вважаючи вимірювання, виконані за допомогою заводських містків, еталонними.

Контрольні запитання

1. У чому полягають особливості вимірювання опорів містковими методами?
2. Поясніть принцип роботи схеми містка Уітстона.
3. Як за допомогою містка Уітстона можна вимірювати малі опори?
4. При якому положенні рухомого контакту точність вимірювання містком Уітстона максимальна?
5. При яких співвідношеннях опорів R_1 , R_2 і R_x , R_e чутливість містка максимальна?
6. Який принцип вимірювання малих та великих опорів за допомогою одинарно-подвійних мостів?

II. Визначення опорів за допомогою вольтметра та амперметра

Прилади і матеріали: 1) джерело постійного струму (випрямляч типу В4—12); 2) реостат на 1200 Ом; 3) вольтметр на 30 В типу Э515; 4) міліамперметр до 15 мА; 5) магазин опорів типу МСР-60, КСМ-4; 6) перемикач.

Теоретичні відомості

Найпростіший метод вимірювання опорів ґрунтується на застосуванні закону Ома для ділянки кола. Принципіальну схему вимірювання опорів побічним методом за допомогою вольтметра і амперметра наведено на рис. 35.

Якщо перемикач знаходиться в положенні «1», тоді вольтметр вимірює суму падів напруги на опорі R_x і на міліамперметрі. Шуканий опір знаходиться за формулою

$$R_x = (U - U_A) / I_A = U / I_A - R_A, \quad (1)$$

де U — напруга, яку показує вольтметр; U_A — падіння напруги на міліамперметрі; I_A — струм у колі; R_A — опір міліамперметра.

Чим більший невідомий опір R_x порівняно з опором R_A , тим точніший результат вимірювання. Якщо $R_x \gg R_A$, то опором R_A нехтуємо, отже,

$$R_x \approx U / I_A. \quad (1')$$

В результаті опір, обчислений за наближеною формулою (1'), буде більшим, ніж насправді.

Якщо перемикач перевести в положення «2», то покази вольтметра відповідатимуть дійсним значенням спаду напруги на опорі.

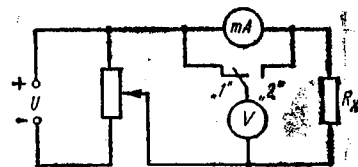


Рис. 35

Амперметр покаже загальну силу струму, що проходить через опір R_x і вольтметр.

Невідомий опір обчислюється за формулою

$$R_x = U / (I_A - I) = \frac{U}{I_A - U/R_V}, \quad (2)$$

де I — струм, що проходить через вольтметр; R_V — опір вольтметра; I_A — струм, що вимірюється міліамперметром; U — напруга, яку показує вольтметр.

Якщо опір $R_x \ll R_V$ (приблизно в 100 і більше разів), тоді струм I набагато менший, ніж струм, що проходить через невідомий опір, і ним можна знехтувати.

$$R'_x \approx U / I_A. \quad (2')$$

Опір, обчислений за цією наближеною формулою, буде меншим, ніж насправді.

Залежно від параметрів, які використовуються в даній роботі, систематична похибка може досить сильно впливати на кінцевий результат.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 35.
2. Проаналізувати величини опорів, які необхідно визначити (за вказівкою викладача даються значення опорів 100—700 або 1400—2000 Ом), і порівняти їх з внутрішніми опорами приладів.
3. Відповідно до значення опору R_x вибрати схему вимірювання (перемикач в положенні «1» або «2»).
4. Провести ряд вимірювань напруги і сили струму. Розрахувати значення опору за формулами (1), (1') або (2), (2') відповідно до обраної схеми.

5. Розрахувати похибку вимірювань за формулою

$$\gamma = \frac{R'_x - R_x}{R_x} \cdot 100 \, \%.$$

6. Порівняти значення опорів, обчислених за формулами (1), (1'), (2), (2'), із заданими значеннями. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Пояснити можливість застосування використаних в роботі схем для практичного вимірювання опорів.
2. Які недоліки і переваги даного методу вимірювання опорів в порівнянні з містковими?

III. Вивчення залежності опору металів від температури і визначення температурного коефіцієнта опору

Прилади і матеріали: 1) термостат типу ТС-15 (ТС-16); 2) цифровий вольтметр типу В7—20 (В7—27) або місток постійного струму для вимірювання опорів, наприклад, типу МВУ-49; 3) досліджуваний провідник.

Теоретичні відомості та опис приладів

Вивчення температурної залежності опору металів має важливе значення в експериментальній фізиці і особливо в метрології. На властивості металів змінювати опір із зміною температури ґрунтується

принцип роботи термометрів опору, призначених для вимірювання температури.

Термометри опору — це високочутливі прилади, здатні вимірювати різницю температур менш як 0,001 К. Вони позбавлені цілого ряду недоліків, властивих рідинним термометрам (залежності показів від температури середовища, депресії скла, похибок при градуванні тощо), тому термометри опору застосовують при температурних вимірюваннях в досить широкому інтервалі — від температур поблизу абсолютного нуля до 1000 К.

Найкращим матеріалом для термометрів опору є чиста платина, яка в широкому інтервалі температур стабільно зберігає свої властивості. Крім платини для виготовлення термометрів опору широко застосовується мідь. Вітчизняна промисловість в широкому асортименті випускає як платинові (індекс типу ТСП), так і мідні (ТСМ) термометри опору. Температурна залежність опору їх добре відома і, вимірявши електричний опір за допомогою містка, можна точно визначити температуру об'єкта.

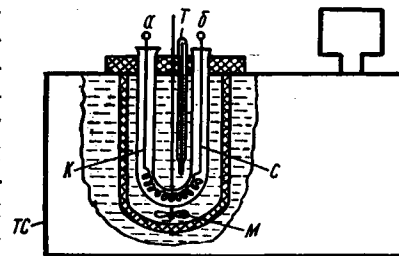


Рис. 36

На рис. 36 зображено схему установки для визначення температурної залежності опору металів.

До клем $a-b$ підключають цифровий вольтметр або місток постійного струму, за допомогою якого визначається опір металевої спіралі КС, яка знаходиться у U-подібній скляній трубці.

Скляна трубка і мішалка М кріпляться до кришки, спеціально виготовленої з ебоніту, текстоліту, фторопласту тощо.

Всю систему поміщають в масляну ванну спеціальної посудини і встановлюють в термостаті типу ТС-15. Нагрівання, охолодження, а також регулювання температури здійснюються за допомогою термостата. Як термостатичну рідину можна використати воду, для високих температур (до 200 °С) — силіконове масло марки М-5.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити схему установки, підготувати до роботи цифровий вольтметр або місток постійного струму для вимірювання опорів. За заводською інструкцією ознайомитися з будовою та прийомами роботи з термостатом.

2. Включити термостат і мішалку М. Виміряти опір при кімнатній температурі. Зняти покази термометра. Вимірювання провести кілька разів, взяти середнє значення R .

3. Збільшити температуру термостата на 15—20 К. Зафіксувавши опір при даній температурі, протягом 10—15 хв провести вимірювання. Повторити його кілька разів і взяти середнє значення.

4. Стрибкоподібно змінюючи щоразу температуру на 10—15 К через однакові інтервали, провести вимірювання опору, а також температури до максимально можливої, яку визначає викладач.

5. Результати експерименту подати графічно (залежність $R = f(T)$). Обчислити середню величину температурного коефіцієнта опору за формулою (6) і його точне значення за формулою (в).

6. Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. У чому суть класичної електронної теорії провідності металів?
2. Назвіть способи вимірювання температури.
3. Дайте характеристику абсолютної шкали температур.
4. Які переваги і недоліки вимірювання температури за допомогою термометрів опору порівняно з вимірюванням її звичайними термометрами?
5. Дати означення температурного коефіцієнта опору.

IV. Вивчення залежності опору електролітів від температури

Прилади і матеріали: 1) термостат типу ТС-16; 2) U-подібна трубка; 3) набір електролітів різної концентрації: 1, 3, 5 %-й розчини NaCl; 4) реохордний місток типу Р-38.

Теоретичні відомості та опис приладів

Електроліти — речовини, які при розчиненні надають розчину здатності проводити електричний струм. До таких речовин належать передусім водні розчини основ, неорганічних кислот та солей, а також деякі тверді речовини, наприклад тверді розчини і іонні кристали. Електроліти при розчиненні самочинно розпадаються (дисоціюють) на іони, які є незалежними кінетичними одиницями.

Ступенем дисоціації α називається відношення числа дисоційованих молекул до початкового числа недисоційованих молекул. Електропровідність електролітів зростає з підвищенням температури. Це відбувається внаслідок дії кількох факторів: поперше, з підвищенням температури зростає ступінь дисоціації, по-друге, зростає рухливість іонів, яка обер-

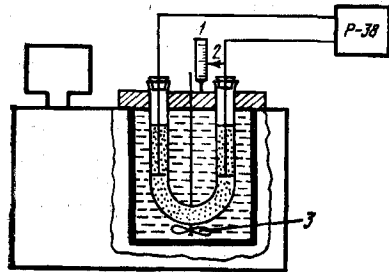


Рис. 37

нено пропорційна в'язкості. Опір електролітів при будь-якій температурі можна визначити за формулою (а).

В даній роботі потрібно визначити залежність електропровідності електролітів від концентрації електроліта і температури. Принципіальну схему установки наведено на рис. 37. Вимірювання опору електроліту проводиться реохордним містком Р-38 на змінному струмі. Використання змінного струму дає змогу уникнути явища поляризації електродів.

U-подібну трубку однакового поперечного перерізу кладуть у спеціальну посудину, яка встановлюється в термостат. Електроди в U-подібній трубці можуть вільно переміщуватись в затискачах разом з показником 2. За допомогою показника 2 і лінійки 1, закріпленої нерухомо на кришці, можна знаходити відстань, на яку перемістились

електроди. Як термостатуюча рідина використовується дистильована вода. В посудині є мішалка 3, яка забезпечує рівномірне прогрівання рідини в посудині.

Порядок виконання роботи

1. За заводською інструкцією ознайомитися з будовою та прийомами роботи з термостатом і реохордним містком. Скласти коло за схемою рис. 37.

2. Заповнити U-подібну трубку електролітом найменшої концентрації.

3. Увімкнути живлення термостата і мішалки 3. При кімнатній температурі виміряти опір електроліту при двох різних відстанях між електродами — l_1 і l_2 . Дані занести до таблиці.

4. Обчислити питомий опір за формулою $\rho = (R_2 - R_1)/(l_2 - l_1)$ і питому провідність за формулою $\sigma = 1/\rho$.

5. Розрахунки питомої провідності при кімнатній температурі провести 3—5 разів при різних відстанях між електродами. Обчислити середнє значення питомої провідності.

6. Змінюючи в U-подібній трубці електроліти різних концентрацій, провести вимірювання при кімнатній температурі, як зазначено в пп. 3, 4, 5. Побудувати графік залежності $\sigma = f(C)$, де C — концентрація електроліту.

7. Для вибраної концентрації (за вказівкою викладача) визначити температурну залежність опору електроліта R при фіксованому положенні електродів (наприклад, l_1).

Підвищення температури рідини в термостаті здійснювати ступінчасто, протягом 10—15 хв, щоразу досягаючи надійного термостатування при кожній температурі. При кожній температурі опір виміряти тричі. Обчислити середнє значення опору.

8. Побудувати графік залежності $R = f(T)$ і за формулою (6) визначити температурний коефіцієнт опору для різних інтервалів температур.

Контрольні запитання

1. Пояснити суть явища електролітичної дисоціації. Який її механізм?
2. Вивести формулу для питомої електропровідності електролітів. Пояснити на її основі добути в роботі експериментальні результати.

V. Градування вольтметра для вимірювання великих та малих опорів

Прилади та матеріали: 1) батарея акумуляторів; 2) реостат типу РПШ-0,6 (500 Ом, 0,6 А); 3) магазин опорів типу МСР-60; 4) вольтметр типу М45 на 3 В; 5) заводський омметр типу ММВ або М371 чи тестери типу Ц4312, Ц4314; 6) вимикачі.

Порядок виконання роботи

А. Послідовне з'єднання магазину опорів і вольтметра.

1. Скласти схему омметра за рис. 38, а.

- Магазин опорів поставити в нульове положення. Реостатом добитися відхилення стрілки вольтметра на всю шкалу.
- Змінюючи опір кола за допомогою магазину опорів, фіксувати відповідні значення напруги.
- Побудувати графік залежності показів вольтметра від опору.

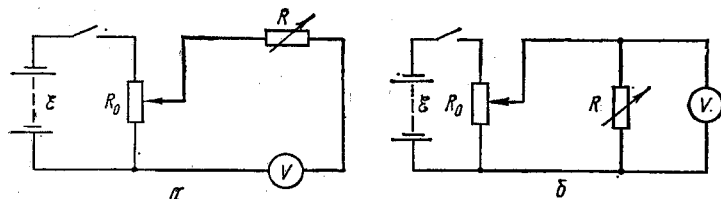


Рис. 38

Б. Паралельне з'єднання магазину опорів і вольтметра.

- Скласти схему за рис. 38, б.
- Виконати операції, зазначені в пп. 2—4.
- За допомогою побудованих графіків визначити невідомий опір.
- Оволодіти методикою користування одним із заводських омметрів.
- Порівняти результати даної роботи із добутими за допомогою заводського омметра.

Контрольні запитання

- Яка із схем рис. 38 призначена для вимірювання малих, а яка — для великих опорів?
- У чому полягає принцип вимірювання опорів за допомогою омметра?

8. Вивчення контактних електричних явищ [8—14, 16—18]

Коло явищ, пов'язаних з виникненням термоелектричного струму при різній температурі контактів (явища Пельтьє і Томсона), дістали загальну назву *термоелектричних явищ*.

Складемо з металів В і С замкнене коло (рис. 39). Місця спаїв 1 і 2 підтримуватимемо при однаковій температурі. В місцях контактів 1 і 2 виникне контактна різниця потенціалів $U_2 - U_1$, але в колі струму не буде:

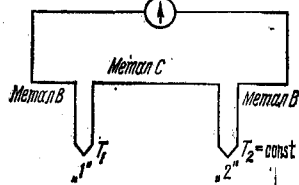


Рис. 39

$$U_2 - U_1 = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1},$$

де A_1, A_2 — роботи виходу електронів із металів; k — стала Больцмана; T — абсолютна температура; n_1, n_2 — концентрації вільних електронів в металах; e — заряд електрона.

Це пояснюється тим, що у тонкому шарі контакту двох металів виникає подвійний електричний шар і його сили гальмують дальший перехід електронів — настає динамічна рівновага. Нагріватимемо спаї

1 і 2 до різних температур T_1 і T_2 . У колі виникне струм і термо-е. р. с., яка дорівнює різниці контактних різниць потенціалів $U_2 - U_1$ в точках 1 і 2:

$$\mathcal{E} = \frac{k(T_2 - T_1)}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = c(T_2 - T_1), \quad (a)$$

де $c = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$ — стала термопар, яка дорівнює е. р. с., що виникає при різниці температур в один градус. Таким чином, з формули (a) видно, що е. р. с. термопар пропорційна різниці температур її спаїв.

Експеримент показує, що стала c у різних пар металів і даної пари металів для різних температурних інтервалів має різні значення. Отже, треба визначати диференціальні значення сталої термопар для окремих температурних інтервалів:

$$c = \frac{d\mathcal{E}}{dT} \approx \Delta\mathcal{E}/\Delta T. \quad (б)$$

1. Виготовлення та градування термопар

Прилади і матеріали: 1) мідний і константовий провідники діаметром 0,15—0,20 мм; 2) пристрій для зварювання термопар; 3) набір термометрів до 473 К; 4) цифровий вольтметр типу В-7—21, В-7—28 або потенціометр постійного струму типу ПП-63; 5) нагрівник; 6) набір матеріалів: олово, свинець, скипидар; 7) лупа.

Теоретичні відомості та опис приладів

Термопарою називають пристрій з двох різнорідних провідників, з'єднаних між собою надійним контактом (зварені або спаєні). В місцях з'єднань провідників підтримується різна температура, при цьому на кінцях провідників виникає термоелектрорушійна сила.

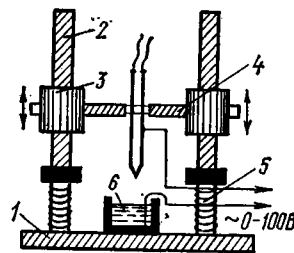


Рис. 40

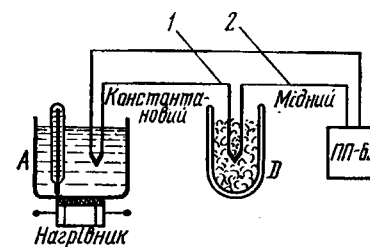


Рис. 41

Термопары широко застосовують для вимірювання і контролю за сталістю температури — це так звані термоелектричні термометри, які складаються з термопар і приладу, який вимірює термо-е. р. с. (рис. 39). Якщо один спай термопар, наприклад «1», підтримувати при сталій температурі (273 К), а другий «2» нагрівати, то прилад покаже певні значення е. р. с.; за цими значеннями будується графік залежності е. р. с. термопар від температури. Такий термоелектричний термометр являє собою так звану *диференціальну термопару*.

У багатьох випадках термопару з'єднують з вимірювальним приладом мідними провідниками. Диференціальні термопари широко застосовуються в лабораторіях при наукових дослідженнях. При цьому один із спайів поміщають у посудину Дьюара, наповнену подрібненим льодом і дистильованою водою.

Залежно від робочих температур на практиці застосовують такі типи термопар:

1. До 1900 К — група ПП, платина — платинородій (90 % Pt, 10 % Rh) ($c = 6,4 \cdot 10^{-3}$ мВ/К).

2. До 1300 К — група ХА, хромель (90 % Ni, 10 % Cr) — алюмель (95 % Ni, 5 % AlSiMg) ($c = 4,1 \cdot 10^{-2}$ мВ/К).

3. До 900 К — група ХК, хромель — копель (56 % Cu, 44 % Ni) ($c = 6,95 \cdot 10^{-2}$ мВ/К).

4. До 600 К — група МК, мідь — копель ($c = 4,75 \cdot 10^{-2}$ мВ/К). Для температур від низьких до 600 К широко застосовують мідь-константанові термопари із сталюю $c = 4 \cdot 10^{-2}$ мВ/К.

У даній роботі пропонується виготовити мідь-константанову термопару і проградувати її по реперних точках.

Схему пристрою для виготовлення термопари наведено на рис. 40. Пристрій виготовлено з ізолюючого матеріалу (ебоніт, плексиглас, текстоліт тощо). Він складається із підставки 1, на якій закріплено два стержні 2. По стержнях можуть вільно переміщуватись два циліндри 3, між якими закріплено ізолюючу пластину 4 з спеціальним металевим затискачем для провідників і гніздом для підведення струму — це рухомий контакт. На підставку 1 ставиться скляна кювета 6 з розчином NaCl, до якої підводиться провідник від знижувального трансформатора. На стержні надіто дві пружні спіралі 5, які не дають можливості рухомому контакту самочинно переміщатися вниз. Живлення здійснюється від трансформатора типу РНШ-250.

На рис. 41 наведено схему установки для градування термопари по реперних точках (1 — константановий провідник, 2 — мідний). А — гарячий спай термопари; D — холодний спай термопари в посудині Дьюара з льодом.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою наждачного паперу зачистити кінці мідного і константанового провідників на відстань до 2—3 мм і скласти їх паралельно в п р и т у л (!) один до одного, навіть трохи їх скрутивши.

2. Закріпити провідники в металевий затискач і скласти електричну схему згідно з рис. 40. Встановити напругу 30—80 В (залежно від площі поверхні електроліту).

3. Замкнути коло. За допомогою рухомих циліндрів наблизити кінці провідників, що виступають, до поверхні електроліту, поки не виникне електрична іскра. Відпустити рухомі циліндри (під дією пружних сил вони повернуться в попереднє положення).

У в а г а! Суворо дотримуватися правил техніки безпеки при роботі з приладом. Працювати в темних захисних окулярах.

4. За допомогою лупи візуально перевірити якість зварювання. На кінцях провідників спостерігатиметься кулька з розплавленого металу.

5. Скласти електричну схему згідно з рис. 41. Перевірити роботу термопари, нагріваючи її спай разом з термометром в посудині з дистильованою водою до кипіння. Через кожні 10 К вимірювати термо-е. р. с. і заносити результати до таблиці.

6. Визначити термо-е. р. с. термопари, зануливши її по черзі в киплячий скипидар ($t = 160^\circ\text{C}$), розплавлене олово ($t = 231,8^\circ\text{C}$) і свинець ($t = 327^\circ\text{C}$).

7. Побудувати графік залежності $\mathcal{E} = f(t)$. Визначити для окремих інтервалів сталу термопару за формулами (а) чи (б).

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть термоелектричних явищ? Яка їх природа?
2. Які є типи термопар? Охарактеризуйте області застосування термопар.
3. Охарактеризуйте способи вимірювання і контролю температури.
4. Які переваги і недоліки термопар порівняно з іншими методами вимірювання температури?

II. Дослідження прямих та зворотних термоелектричних явищ

Прилади і матеріали: 1) мідь-константанові термопари; 2) два джерела струму на 6—12 В; 3) два реостати до 30 Ом, 3 А; 4) два амперметри типу Э514 до 3 А; 5) вольтметр типу Э515 до 12 В; 6) два калориметри; 7) посудина Дьюара з льодом; 8) чутливий гальванометр будь-якого типу; 9) нуль-гальванометр типу М2031/1; 10) два вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

В роботі визначається е. р. с. термопари \mathcal{E}_T методом компенсації і стала c термопари. Принципіальну схему установки наведено на рис. 42. DC — реохордна лінійка, опір якої R відомий, \mathcal{E} — акумуляторна батарея 2,5—3 В. За допомогою рухомого контак-

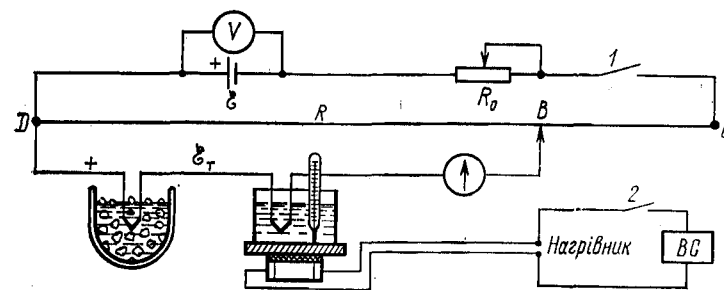


Рис. 42

ту B можна добитися, щоб струм через гальванометр не проходив — спад потенціалу на ділянці DB дорівнюватиме е. р. с. термопари \mathcal{E}_T ($U_{DB} = \mathcal{E}_T$).

Із закону Ома

$$U_{DB} = IR_{DB},$$

де I — струм у колі, який визначається із закону Ома

$$I = U/(R_0 + R),$$

U — спад напруги в зовнішньому колі, який визначається вольтметром. Знаходимо:

$$\mathcal{E}_\tau = U_{DB} = UR_{DB}/(R_0 + R).$$

Для реохорда справедливим буде співвідношення

$$R/R_{DB} = l/l_{DB} \text{ або } R_{DB} = Rl_{DB}/l.$$

Остаточно робоча формула запишеться так:

$$\mathcal{E}_\tau = \frac{UR}{R_0 + R} \cdot \frac{l_{DB}}{l}. \quad (1)$$

Ж. Пельтьє у 1834 р. відкрив явище, обернене до ефекту Зеебека. Це явище дістало назву *ефекту Пельтьє*. Суть явища в тому, що коли пропускати струм через контакт двох різномірних металів залежно від напрямку струму на межі провідників виділятиметься або поглинатиметься крім джоулевої ще певна кількість теплоти, яка дістала назву *теплоти Пельтьє*. Кількість теплоти Пельтьє пропорційна першому степеню сили струму, знак її змінюється при зміні напрямку струму (теплота Ленца — Джоуля пропорційна квадрату сили струму). Крім того, теплота Пельтьє не залежить від опору провідника.

Експериментально встановлено, що

$$Q_P = \Pi/\tau, \quad (2)$$

де Π — коефіцієнт Пельтьє, який залежить від електрофізичних властивостей провідників, що контактують, і температури.

Умовилися вважати теплоту Пельтьє додатною, якщо вона виділяється, і від'ємною, якщо вона поглинається. Класична теорія металів пояснює ефект Пельтьє тим, що електрони під дією внутрішньої контактної різниці потенціалів між металами прискорюються або уповільнюються. Якщо рух електронів прискорюється, кінетична енергія їх зростає і виділяється у вигляді тепла, і навпаки — зменшення кінетичної енергії поповнюється за рахунок теплових коливань атомів другого металу. Для металів коефіцієнт Пельтьє порядку 10^{-2} — 10^{-3} В, а для напівпровідників понад 0,3—0,001 В. Ефект Пельтьє широко застосовується в холодильних установках. Для кількісного аналізу явища Пельтьє спаї термопар опускаються в два калориметри (рис. 43). Через обидва спаї в одному напрямі пропускається струм. В обох калориметрах виділятиметься теплота Ленца — Джоуля. Теплота Пельтьє в одному калориметрі виділятиметься, в другому — поглинатиметься. Це можна записати так:

$$Q_1 = I^2 R \tau + \Pi/\tau; \quad Q_2 = I^2 R \tau - \Pi/\tau,$$

де Q_1 і Q_2 — повні кількості теплоти, які виділялися відповідно в першому і другому калориметрах за однаковий час τ . Віднявши почленно друге рівняння від першого, маємо:

$$2\Pi/\tau = Q_1 - Q_2. \quad (3)$$

Принципальну схему установки для визначення коефіцієнта Пельтьє і теплоти Пельтьє, яка виділяється в одиницю часу, наведено на рис. 43.

Як видно із формули (3), для визначення коефіцієнта Пельтьє треба обчислити різницю повних теплот $Q_1 - Q_2$, які виділяються в першому і другому калориметрах. Експериментально це роблять в такий спосіб. Припустимо, що

в результаті ефекту Пельтьє лівий спай охолоджується, а правий нагрівається. Різниця температур визначається за допомогою диференціальної термопари і гальванометра. У лівий калориметр вміщено нагрівну спіраль H . За допомогою реостата R_1 струм у нагрівнику можна підібрати так, що встановиться теплова рівновага, коли кількість теплоти, що відбирається в результаті ефекту Пельтьє, дорівнюватиме кількості теплоти, що виділяється в нагрівнику H . При цьому температура спаїв A і B термопар однакова. Про це свідчитиме відсутність струму в гальванометрі. Різниця повних теплот $Q_1 - Q_2$ дорівнює кількості теплоти, що виділилася в нагрівнику:

$$Q_1 - Q_2 = I_n^2 R_n.$$

Отже, коефіцієнт Пельтьє

$$\Pi = I_n^2 R_n / 2I_0, \quad (4)$$

де I_n , I_0 — сила струму, який проходить відповідно через нагрівник і термопару з спаєм A і B .

Порядок виконання роботи

1. Визначити е. р. с. термопар методом компенсації.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 42. Один спай термопар помістити в посудину Дьюара з льодом.

2. Замкнути вимикач 2 і підігріти другий спай термопар до 353—363 К. Розімкнути вимикач і почекаати, поки припиниться підвищення температури в посудині.

3. Рухомим контактом B реохорда встановити нуль на гальванометрі. Записати в таблицю покази термометра, відстань по шкалі реохорда і покази вольтметра.

4. Повторити вимірювання (8—10 раз), знижуючи температуру калориметра через кожні 5 К.

5. За формулою (1) визначити е. р. с. термопар для кожного значення температури. Побудувати графік залежності $\mathcal{E}_\tau = f(T)$.

6. Із графіка визначити сталу термопар s . З формул (а), (б) видно, що s дорівнює тангенсу кута нахилу прямої $\mathcal{E}_\tau = f(T)$ до осі T .

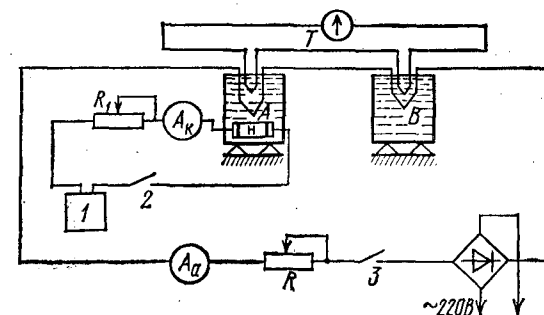


Рис. 43

11. Визначити теплоту і коефіцієнт Пельтьє.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 43.
2. Замкнути вимикач 3 і встановити певну силу струму. Зачекати, поки стрілка гальванометра перестане відхилятися, що свідчитиме про настання стаціонарного режиму.
3. Ввести реостат R повністю і замкнути вимикач 2. Зачекати, поки стрілка гальванометра перестане відхилятися.
4. Реостатом ступінчасто змінити силу струму I_n і знову добитися стану теплової рівноваги. Дослід припинити, коли нульове положення стрілки гальванометра не буде змінюватися. Записати значення I_n і I .
5. Розрахувати за формулами (4) і (2) коефіцієнт і теплоту Пельтьє.
6. Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Що називають внутрішньою і зовнішньою контактними різницями потенціалів?
2. Як експериментально було доведено існування контактної різниці потенціалів?
3. У чому суть ефектів Зеебека, Пельтьє, Томсона?
4. Як пояснити ефекти Пельтьє і Зеебека на основі уявлень класичної фізики?
5. Чому сили струму I_n і I можна визначити лише при стаціонарному тепловому режимі?

9. Дослідження електричного струму в напівпровідниках [8—14, 18]

Напівпровідники — це широкий клас речовин, які за своєю електропровідністю займають проміжне положення між металами і діелектриками. Основні властивості напівпровідників такі: а) їх електропровідність і концентрація носіїв струму дуже залежить від зовнішніх впливів (температури, домішок, опромінення та ін.); б) з підвищенням температури електропровідність напівпровідників зростає і не пов'язана з перенесенням речовини (їх провідність має електронний і дірковий характер).

Властивості кристалічних напівпровідників задовільно пояснюються зонною теорією твердого тіла. Енергетичний спектр електронів в напівпровідниках зумовлений їх взаємодією не тільки з своїм атомом, а й з сусідніми. Це приводить до утворення так званих енергетичних зон (дозволених та заборонених). Ширина дозволених зон становить кілька електронвольт. Кожна з дозволених зон складається з великого, але скінченного числа енергетичних рівнів. Воно визначається кількістю атомів в кристалі, дискретні енергетичні рівні яких утворюють дану зону. Зона, яка містить N рівнів, може згідно з принципом Паулі містити $2N$ електронів. Зона, що складається з повністю заповнених електронами рівнів, називається *валентною*. Зона, для якої не всі рівні зайняті електронами, називається *вільною* або *зоною провідності* (рис. 44, а). Якщо валентна зона відділена від зони провідності інтервалом енергії ΔW (ширина забороненої зони) порядку 1 еВ або менше, то при кімнатних температурах і вище для чистих кристалів є характерною помітна електропровідність, зумовлена рухом електро-

нів в зоні провідності і дірок у валентній зоні. Такі чисті речовини з вузькою забороненою зоною називаються власними напівпровідниками. У напівпровідників при $T = 0$ К валентна зона повністю заповнена електронами, а зона провідності повністю вільна (рис. 44, б).

З підвищенням температури інтенсивність теплового руху зростає і електрон може дістати додаткову кінетичну енергію (порядку kT) для переходу в зону провідності. У валентній зоні звільняються квантові стани, не зайняті електронами. Такі вакантні стани називаються дірками. Провідність, зумовлену рухом дірок у валентній зоні, називають дірковою провідністю p -типу на відміну від звичайної електронної провідності n -типу. Слід підкреслити, що дійсними носіями струму є електрони, а не формально введені дірки. Напівпровідники з електричною і дірковою провідностями називаються *власними*. Введенням в чистий напівпровідник певних домішок дістають домішкову провідність n - або p -типу.

Температурну залежність питомої електропровідності напівпровідників можна подати у вигляді

$$\sigma = A \exp \{ -\Delta W / 2kT \}, \quad (a)$$

де ΔW — ширина забороненої зони, або енергія активації; A — деяка стала, що залежить від природи напівпровідника. Напівпровідники мають від'ємний температурний коефіцієнт опору.

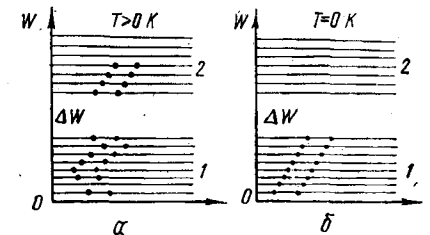


Рис. 44

1. Вивчення залежності опору напівпровідників від температури

Прилади і матеріали: 1) термостат типу ТС-15; 2) набір термометрів до 473 К; 3) цифровий вольтметр типу В7—20 або міст постійного струму типу МВУ-49; 4) зразки напівпровідників правильної геометричної форми; 5) мідь-константанова термопара; 6) міст постійного струму ПП-63 або цифровий вольтметр типу В7—16 чи В7—28.

Теоретичні відомості та опис приладів

Одна з ознак напівпровідників, якою вони відрізняються від металів, — залежність їх питомої провідності від температури. При низьких температурах питома провідність зменшується, при абсолютному нулі напівпровідник перетворюється на ізолятор. При високих температурах електропровідність напівпровідників наближається до електропровідності металів. Наприклад, при кімнатній температурі питомий опір кремнію має величину $6 \cdot 10^2$ Ом · м, а при 973 К — 10^{-3} Ом · м. Такий характер залежності пояснюється тим, що, на відміну від металів, концентрація носіїв струму в напівпровідниках змінюється із зміною температури, а саме — зростає з підвищенням її. Валентні електрони напівпровідників набагато міцніше зв'язані з атомами ядра, ніж в металах. Тому взаємодія атомів у напівпровідниках ще не достатня для відриву електронів від атомів. Питома провідність чистих

напівпровідників виражається формулою (а). Позначимо сталу $A = \sigma_0$, тоді

$$\sigma = \sigma_0 \exp \{-\Delta W/2kT\},$$

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \Delta W/2kT.$$

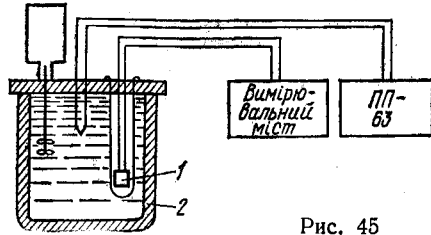


Рис. 45

Отже, логарифм електропровідності напівпровідників є лінійною функцією від величини $1/T$. У даній роботі і пропонується дослідити температурну залежність питомої провідності напівпровідників.

Напівпровідник 1 у скляній пробірці вміщено в термостат 2 (рис. 45). Як термостатуючу рідину беруть дистильовану воду або силіконове масло марки М-5 (до температури 473 К). Температура зразка вимірюється за допомогою термопари і містка постійного струму ПП-63 або цифрового вольтметра типу В7—16, В7—28.

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою рис. 45. Термопару прикріпити до досліджуваного зразка.
2. Виміряти опір зразка при кімнатній температурі. Підвищуючи температуру, виміряти опір через кожні 5—10 К.
3. За допомогою цифрового вольтметра або містка ПП-63 і градуювальної таблиці для мідь-константової термопари визначити температури, при яких проводяться вимірювання.
4. Обчислити питомі провідності напівпровідника при кожній температурі за формулою

$$\sigma = l/RS,$$

де l — довжина зразка, м; S — площа поперечного перерізу, m^2 . Дані занести до таблиці.

5. Побудувати графік залежності

$$\ln \sigma = f(1/T).$$

Величину $\ln \sigma$ відкласти вздовж осі ординат.

6. Визначити з графіка кутовий коефіцієнт прямої

$$\operatorname{tg} \varphi = \Delta W/2k$$

і обчислити з цієї формули ширину забороненої зони.

Контрольні запитання

1. Який механізм власної провідності напівпровідників?
2. Який механізм домішкової провідності напівпровідників?
3. У чому суть зонної теорії провідності металів і напівпровідників?
4. Чим пояснюється зміна концентрації електронів провідності в напівпровідниках із зміною температури?
5. Що таке термістори і де вони застосовуються?

II. Дослідження напівпровідникового діода

Прилади і матеріали: 1) напівпровідниковий діод типу Д7Д, Д7Ж, Д226; 2) випрямляч типу ВС4-12 або акумуляторна батарея на 6 В; 3) реостати на 500 та 5000 Ом типу РПШ-0,6; РПШ-0,2; 4) багатограничний амперметр для вимірювання струмів до 0,5 А; 5) багатограничні вольтметри для вимірювання напруг до 1 В та до 100 В; 6) універсальний випрямляч типу ВУП (до 200 В); 7) два перемикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Розглянемо явища, які відбуваються в місці контакту двох провідників n - і p -типу (рис. 46, а). Внаслідок теплового руху через місце контакту відбувається дифузія електронів і дірок. Напівпровідник n -типу втрачає електрони і тому заряджається позитивно. Водночас напівпровідник p -типу заряджається негативно. Поблизу межі поділу утворюється подвійний електричний шар (запірний шар), який створює контактне електричне поле, що перешкоджає дальшій однобічній дифузії електронів в напрямі $n \rightarrow p$ і дірок в протилежному напрямі.

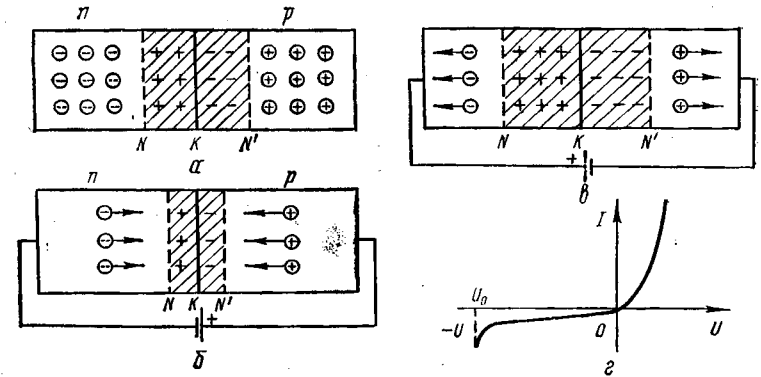


Рис. 46

Концентрація носіїв струму в контактному шарі внаслідок їх рекомбінації набагато менша, ніж в об'ємі напівпровідника, тому цей шар називають *запирним*.

Прикладемо до контакту p - n напівпровідників зовнішнє електричне поле так, щоб струм проходив від напівпровідника p -типу до напівпровідника n -типу (рис. 46, б). Дірки і електрони почнуть перемішуватись в напрямі до контакту. Опір запірного шару внаслідок збільшення концентрації носіїв струму зменшиться, і через контакт піде більший струм. Цей напрям струму називається *прямим*.

Прикладемо до контакту p - n напівпровідників зовнішнє електричне поле в напрямі від напівпровідника n -типу до напівпровідника p -типу (рис. 46, в). Під дією зовнішнього поля дірки і електрони рухатимуться вглиб відповідних напівпровідників, зона запірного шару збільшиться, а тому зросте і його опір. Сила струму, що проходить через контакт, зменшиться. Такий напрям струму називається *запирним*. На цих властивостях p - n переходу ґрунтується дія напівпровідникового діода (двохелектродного напівпровідникового приладу). На рис. 46, г

зображено типову залежність струму (він проходить через $p-n$ перехід від прикладеної напруги), так звану вольт-амперну характеристику. З рис. 46, з видно, що при $U > 0$ опір переходу незначний і струм різко зростає; при $U < 0$ опір великий і струм практично лишається незмінним до деякого значення U_0 , при якому струм різко зростає. Така напруга називається *пробивною*.

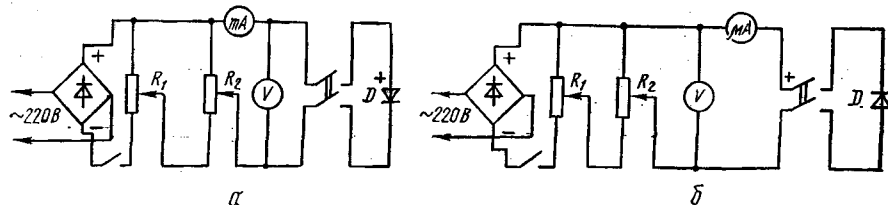


Рис. 47

Випрямні діоди широко використовуються для випрямлення промислового струму. Виготовляють їх з напівпровідників, що мають великий опір (германій, кремній, селен, а також Cu_2O).

Найефективнішими є германієві та кремнієві діоди, к. к. д. яких досягає 98 %, і селенові — к. к. д. 70 %.

Метою даної роботи є зняття основної характеристики напівпровідникового діода — вольт-амперної.

На рис. 47 наведено схему для проведення роботи. R_1, R_2 — подільники напруги, за допомогою яких плавно змінюється напруга; mA — багатограничний прилад для вимірювання струмів від 0 до 500 mA ; D — діод.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему за рис. 47, а.
2. Зняти характеристику діода в пропускну напругу. Замкнувши ключ, збільшувати напругу за допомогою подільника напруги від 0 до 0,1 В через 0,05—0,1 В у прямому напрямі. Дані занести до таблиці.
3. Скласти схему за рис. 47, б. Зняти характеристику діода в заперному напрямі. Встановити подільники напруги в нульове положення. Змінювати напругу від 0 до 100 В через кожні 5—10 В. Дані занести до таблиці.
4. Побудувати вольт-амперну характеристику діода.

Контрольні запитання

1. Яка природа електронної та діркової провідності напівпровідників?
2. У чому полягає принцип роботи напівпровідникового випрямляча?
3. Які переваги та недоліки напівпровідникових діодів порівняно з вакуумними?

III. Дослідження статичних характеристик транзистора і визначення його коефіцієнта підсилення

Прилади і матеріали: 1) германієві (типу П14, П15 і т. д.) або кремнієві (типу П101, П103, П501, П503 і т. д.) транзистори; 2) випрямляч напруги; 3) міліамперметр на 3—5 mA ; 4) міліамперметр на 150—500 mA ; 5) вольтметри на 3 і 10 В; 6) реостати типу РПШ.

Теоретичні відомості та опис приладів

Транзистором (напівпровідниковим триодом) називають напівпровідник з двома близько розміщеними $p-n$ переходами. Розрізняють два типи транзисторів: $p-n-p$ і $n-p-n$. Схеми вмикання транзистора типу $p-n-p$ наведено на рис. 48 (а — із спільним емітером E , б — із спільною базою B , в — із спільним колектором K). База B — середня частина транзистора — має електропровідність n -типу. Емітер E і колектор K — області з електропровідністю p -типу, які прилягають до бази. Транзистор $p-n-p$ типу виготовляють так: на пластинку гер-

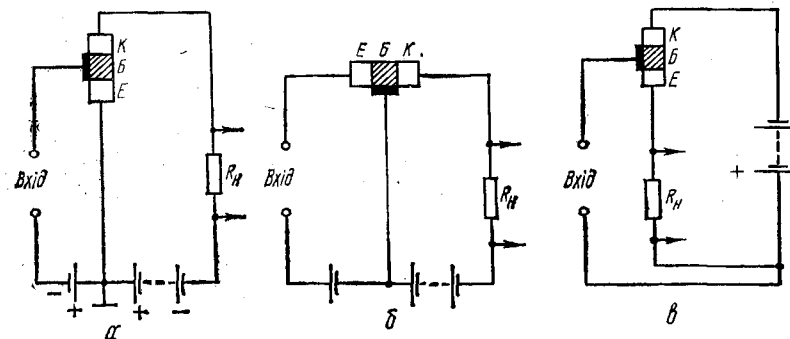


Рис. 48

манію n -типу завтовшки 0,15—0,20 мм з двох боків вплавають індій. До шарів індію і пластинки германію припаюють електроди. Основними носіями струму в емітері і колекторі є дірки, а в базі — електрони. На перехід $p-n$ емітер — база подається напруга в прохідному напрямі. На перехід $n-p$ база — колектор подається більша напруга в заперному напрямі. Це приводить до зниження потенціального бар'єра на першому переході і підвищення на другому.

Струм, який проходить з емітера в базу,

$$I_e = I_{sk} (\exp(U_1/kT) - 1).$$

Струм колектора ($p-n$ перехід), увімкнений у заперному напрямі (при відсутності емітерного струму), дуже малий:

$$I_k = I_{sk} (1 - \exp(-(U_2 - U_1)/kT)),$$

де I_{sk} — струм насичення, пропорційний концентрації електронів в p -області. Великий опір цього переходу дає змогу увімкнути в його коло значний опір, на якому спад напруги

$$U_1 = I_k R.$$

Тут U_1 — спад напруги на $p-n$ переході, коли емітерного струму немає.

Увімкнення напруги в коло емітера збільшує дірковий струм емітера, що веде до збільшення струму колектора:

$$I'_k = I_k + I_e.$$

Відповідно до цього змінюється спад напруги на навантажувальному опорі: $U' = I_k R$.

Струм емітера перевищує струм колектора, тому незначні зміни напруги на емітері спричиняють значно більші зміни колекторного струму і напруги на навантаженні.

Проходження струму в колі емітера супроводиться проникненням дірок в базу. Дірки дифундують у напрямі колектора і збільшують струм, що проходить у запірному напрямі в колі колектора. Спад напруги в колі колектора в багато разів більший, ніж у колі емітера, через те що перехід у запірному напрямі має більший опір, ніж у прохідному. Таким чином, транзистор *п і д с и л ю є напругу і потужність*. Це збільшення потужності відбувається за рахунок джерела струму в колі колектора.

Схема із спільним емітером (рис. 48, а) дає добре підсилення струму і напруги (застосовується найчастіше). Схема із спільним колектором (рис. 48, б) дає найбільше підсилення струму. Схема із спільною базою (рис. 48, в) застосовується у високочастотних підсилювачах.

Якщо на емітер подати змінну напругу U_1 , то потоки дірок через емітерний перехід і колекторний струм будуть змінними. Зміна сили струму емітера ΔI_e зумовить зміну сили струму колектора ΔI_k . Величина

$$\alpha = \Delta I_k / \Delta I_e \quad (1)$$

називається *коефіцієнтом підсилення струму*. З (1) випливає, що в схемах включення транзистора із спільною базою підсилення струму одержати не можна ($\alpha \ll 1$). При цьому може бути підсилення напруги і потужності. Справді, при зміні напруги на емітері на ΔU_e струм емітера змінюється на величину

$$\Delta I_e = \Delta U_e / R_{e-б},$$

де $R_{e-б}$ — опір *p-n* переходу емітер — база. При цьому змінюється і напруга на колекторному *p-n* переході

$$\Delta U_k = \Delta I_k R_{б-к},$$

де $R_{б-к}$ — електричний опір переходу база — колектор. У сучасних транзисторах 95—98 % дірок проходить через базу, тому $I_k = (0,95 - 0,98) I_e$.

Зважаючи на те що $I_k \approx I_e$, маємо:

$$\Delta U_k = \Delta I_e R_{б-к} = \Delta U_e R_{б-к} / R_{e-б}. \quad (2)$$

З (2) знаходимо:

$$K_U = \Delta U_k / \Delta U_e = R_{б-к} / R_{e-б}. \quad (3)$$

Через те що на емітерний перехід подається стала напруга в прямому напрямі, а на колекторний перехід — у зворотному (рис. 48, в), маємо: $R_{б-к} \gg R_{e-б}$, тому

$$K_U = \Delta U_k / \Delta U_e \gg 1.$$

Величина K_U називається *коефіцієнтом підсилення напруги*. Аналогічно доводиться, що коефіцієнт підсилення потужності K_P при включенні транзистора за схемою із спільною базою дорівнює:

$$K_P = \Delta P_k / \Delta P_e \approx \alpha K_U \approx K_U. \quad (4)$$

При включенні транзистора за схемою із спільним емітером (рис. 48, а) на емітерний перехід подається пряма напруга, а на колекторний — зворотна. Тому головний спад напруги припадає на колекторний перехід. Струм у колекторі, як і в схемі з спільною базою, визначається кількістю дірок, які проскакують з емітера через базу в колектор. Але потік дірок з емітера при цьому регулюється напругою U джерела сигналу, яка змінює потенціал поля емітер — база. Більша частина дірок, які перейшли в базу з емітера, переходить в колектор і тільки незначна частина переходить в електричне коло бази, створюючи невеликий струм бази:

$$\Delta I_б (\Delta I_б \ll \Delta I_k).$$

У розглядуваному випадку коефіцієнт підсилення струму β дається виразом

$$\beta = \Delta I_k / \Delta I_б \approx \Delta I_e / \Delta I_б \gg 1. \quad (5)$$

Коефіцієнт підсилення напруги

$$K_U = \Delta U_k / \Delta U_e = R_{б-к} / R_{e-б} \gg 1, \quad (6)$$

а коефіцієнт підсилення потужності

$$K_P = \alpha K_U \beta \approx \beta K_U \gg 1. \quad (7)$$

Порядок виконання роботи

1. Для дослідження статичних характеристик транзистора $I_k = f(U_k)$, включеного за схемою із спільним емітером, скласти електричну схему згідно з рис. 49. При цьому рухомі контакти обох потенціометрів R_1 і R_2 переводять у крайні положення, щоб величини $U_б$ і U_k дорівнювали нулю.

2. Після перевірки схеми включити живлення.

3. Зняти характеристики транзистора при нульовому струмі бази ($I_б = 0$). Для цього змінювати U_k потенціометром R_2 від 0,5 до 12 В через 1 В, підтримуючи $U_б = 0$.

4. Зняти характеристики транзистора при $I_б = 0,5$ мА, підтримуючи його сталим потенціометром R_1 . Зміна U_k досягається потенціометром R_2 .

5. Зняти характеристики транзистора $I_k = f(U_k)$ при $I_б = 1; 1,5; 2,0$ мА, виконуючи операції п. 4.

6. Результати занести до таблиці.

7. Сім'ю колекторних характеристик подати графічно і визначити β при $I_б = 1$ мА і $U_k = 10$ В.

8. Обчислити похибки визначення коефіцієнта β .

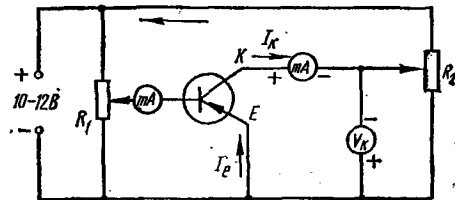


Рис. 49

Контрольні запитання

1. Як виготовляють германієві і кремнієві транзистори?
2. Як подається напруга на емітерний і колекторний переходи в транзисторі?
3. Чому електричний опір емітерного переходу в діючому транзисторі значно менший, ніж опір колекторного переходу?
4. Охарактеризуйте коефіцієнти підсилення транзистора для радіотехнічних схем.

10. Дослідження електричного струму у вакуумі [8—14, 16, 17, 21]

У сучасній техніці широко використовуються *електровакуумні прилади* — радіолампи, електронно-променеві трубки, фотоелектронні помножувачі, вакуумні фотоелементи тощо. Дія цих приладів заснована на проходженні струму у вакуумі. При цьому йдеться про технічний вакуум (розрідження становить 10^{-6} — 10^{-7} Па, в одиниці об'єму ще залишається величезна кількість молекул — близько 10^{14} м⁻³), коли

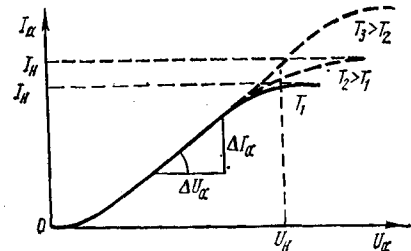


Рис. 50

залишки газу можна не враховувати. Розглянемо процеси, які відбуваються в електронній лампі при постійному струмі розжарення катода.

У відсутності анодної напруги навколо розжареного катода утворюється так звана електронна хмара, яка являє собою просторовий негативний заряд. У стані термодинамічної рівноваги число електронів, які вилетіли з катода, дорівнює числу електронів, що повернулися в метал. При цьому густина електронної хмари тим більша, чим вища температура катода.

Між катодом і анодом прикладається електричне поле, під дією якого і відбувається напрямлений рух електронів, тобто електричний струм у вакуумі. Струм через діод залежить від напруги, прикладеної між катодом і анодом при сталій температурі катода складним способом. При деякому значенні $U_a = U_H$ всі електрони досягають анода, а струм стає таким, що дорівнює струму насичення, і далі його зростання припиняється (рис. 50). Така залежність струму від напруги називається *анодною (вольт-амперною) характеристикою* діода. При невеликих значеннях напруги струм зростає пропорційно $U_a^{3/2}$. Цю залежність встановили С. Богуславський та І. Ленгмюр, і називається вона *законом трьох других*. Формула Богуславського — Ленгмюра має вигляд

$$I_a = K U_a^{3/2}, \quad (a)$$

де K — коефіцієнт пропорційності, який залежить від форми і розмірів електродів лампи.

Формула (a) справедлива при досить великих емісіях катода. Тому для досягнення якомога більшої термоелектронної емісії матеріал катода повинен мати найменшу роботу виходу. Для вольфраму робота виходу становить 4,52 еВ, і дістати великі термоелектричні струми

з вольфрамового катода можна лише при дуже високих температурах (2400—2500 К).

Емісійну здатність матеріалу катода визначає густина термоелектронного струму насичення, що характеризує максимальну кількість електронів, які можуть покинути метал з одиниці поверхні за одиницю часу.

Для визначення густини термоелектронного струму насичення j_n користуються моделлю, згідно з якою сукупність вільних електронів в металі вважають як ідеальний електронний газ, до якого застосовна квантова статистика Фермі — Дірака. Розрахунки, виконані на основі квантової статистики, приводять до такої формули:

$$j_n = AT^2 \exp(-e\phi/kT), \quad (б)$$

де $e\phi$ — робота виходу; A — стала, яка не залежить від роду матеріалу (теоретичне значення її $1,2 \cdot 10^8$ А/(м² · К²)).

Вперше аналітичну залежність струму насичення від роботи виходу встановив О. Річардсон на основі термодинамічних міркувань. Пізніше Дешман вивів цю формулу на основі квантово-механічних міркувань. Тому формула (б) дістала назву формули Річардсона — Дешмана. Ця формула досить добре узгоджується з експериментом. Як видно з (б), густина термоелектронного струму насичення j_n досить швидко зростає з підвищенням температури катода і визначається також значенням роботи виходу. Тому, щоб дістати великий струм насичення, а також для збільшення строку роботи лампи потрібно знижувати робочу температуру катода. Це досягається застосуванням так званих *складних катодів*: барієвих, цезієвих, оксидних та інших, з яких найефективнішим є оксидний. Оксидний катод складається із нікелевого або вольфрамового провідника, на який нанесено суміш оксидів барію і стронцію. В результаті обробки робота виходу таких оксидних катодів зменшується до $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Це дає змогу, згідно з формулою (б), одержувати великі густини струму при порівняно невисоких температурах (1000—1170 К). Оксидні катоди знайшли широке застосування в електровакуумних приладах.

1. Вивчення явища термоелектронної емісії

Прилади і матеріали: 1) електронна лампа типу ГК-71 з вольфрамовим катодом (добуток $Id = 2,1 \cdot 10^{-5}$ м²); 2) випрямляч ВС-24М; 3) повзунковий реостат типу РПШ-5 або РСР (15 Ом; 5 А); 4) амперметр і вольтметр типу З59 з межами вимірювання відповідно до 2 А і до 7,5 В; 5) випрямляч універсальний типу ВУП; 6) повзунковий реостат типу РПШ-0,2 (5000 Ом, 0,2 А); 7) вольтамперметр типу М253, увімкнений як вольтметр для вимірювання анодної напруги в межах 0—30 В. Перемикач кратності встановлено в положення «Х4»; положення перемикача меж вимірювання 7,5 В; 8) вольтамперметр типу М253, увімкнений як міліамперметр для вимірювання анодного струму (струму емісії лампи ГК-71). Перемикач кратності встановлено в положення «Х1»; початкове положення меж вимірювання 0,75 мА (може змінюватися до 7,5 мА); 9) перемикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Для спостереження явища термоелектронної емісії застосовують лампу діод, наприклад, типу ГК-71. Катодом лампи є провідник з тугоплавкого металу (вольфраму, молібдену тощо). Анод має вигляд

співвісного циліндра, розміщеного навколо катода. Струм у колі буде тільки тоді, коли на анод подано позитивний потенціал відносно катода. При зміні полярності струму не буде. Цим підтверджується те, що носіями струму через вакуум є саме електрони.

T, K	$P/d, \text{Вт/см}^2$	T, K	$P/d, \text{Вт/см}^2$	T, K	$P/d, \text{Вт/см}^2$	T, K	$P/d, \text{Вт/см}^2$
1500	17,33	1900	58,45	2300	148,2	2700	312,7
1600	24,32	2000	75,37	2400	181,2	2800	368,9
1700	33,28	2100	95,69	2500	219,3	2900	432,4
1800	44,54	2200	119,8	2600	263,0	3000	503,5

Для практичного застосування формули Річардсона — Дешмана прологарифмуємо рівняння (6):

$$\ln j_n/T^2 = \ln A - e\phi/kT. \quad (1)$$

У такому вигляді на графіку залежності $\ln j_n/T^2$ від $1/T$ кутовий коефіцієнт $\text{tg } \alpha = e\phi/k$, звідки й визначається робота виходу $e\phi$. Такий метод визначення роботи виходу дістав назву методу прямих Річардсона.

Температуру катода, яка входить у формулу (а), визначають на основі розгляду теплової рівноваги катода. Залежність температури вольфрамового катода від розсіюваної на ньому потужності розжарення наведено в таблиці. Для простоти дальших розрахунків значення потужності P поділені на добуток довжини катода l і його діаметра d .

На рис. 51 наведено принципіальну схему установки для вивчення

явищ термоелектронної емісії. Лампу ГЛ-71 включено як діод (сітку лампи з'єднано з анодом). Анодне коло живиться струмом від універсального випрямляча типу ВУП. Анодну напругу можна змінювати грубо ручкою регулятора напруги випрямляча і точно — за допомогою високоомного реостата R .

Живлення катода лампи здійснюється від випрямляча типу ВС-24М. У колі катода для точного регулювання струму розжарення використовують реостат R_k .

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно з рис. 51.
2. Дослідити залежність анодного струму від анодної напруги при струмах розжарення $I_p = 1,7; 1,8; 1,9$ А. Дані занести до таблиці спостережень.
3. За результатами п. 1 побудувати вольт-амперні характеристики

$I_a = f(U_a)$. Для кривої $I_p = 1,7$ А визначити коефіцієнт K у формулі Богуславського — Ленгмюра.

4. При напрузі насичення дослідити залежність термоелектронного струму насичення від потужності, що витрачається на розжарення катода (струм розжарення катода змінюється від 1,5 до 2,0 А). Побудувати графік залежності термоелектронного струму насичення від потужності.

5. За допомогою таблиці методом інтерполяції визначити температуру катода для одержаних значень струму емісії. Побудувати графік залежності густини термоелектронного струму насичення від температури катода $j_n = I_n/\pi ld$ (j_n в А/м²).

6. Побудувати графік залежності $\ln j_n/T^2$ від $1/T$ (густину термоелектронного струму насичення визначити при струмах розжарення, зазначених у п. 2; температуру катода для цих значень визначити, як в п. 5).

7. Розрахувати роботу виходу електронів з вольфраму за графіком і формулою (1) (користуючись десятковими логарифмами, кутовий коефіцієнт прямої треба домножити на 2,3).

8. Обчислити похибку визначення роботи виходу.

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть явища термоелектронної емісії?
2. Яка фізична суть поняття «робота виходу» електрона?
3. Як впливає температура катода на його емісійні властивості?
4. На якій ділянці вольт-амперної характеристики діода застосовна формула Богуславського — Ленгмюра?

II. Зняття анодної і сіткової характеристик електронних ламп

Прилади і матеріали: 1) двоелектродна лампа; 2) трьохелектродна електронна лампа типу 6Н8С; 3) випрямляч на 250 В типу ВУП; 4) випрямляч на 50 В; 5) реостат РПШ-02 (5000 Ом; 0,2 А); 6) вольтамперметр типу М253; 7) міліамперметр з межами вимірювання 0—30 мА і 0—5 А (для постійного струму); 8) вольтметри з межами вимірювання 0—300 В, 0—10 В типу Э59, Э515, АСТ-Т; 9) вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

До основних параметрів діода і тріода належать: крутість характеристики і внутрішній опір діода, коефіцієнт підсилення, крутість сіткової характеристики, внутрішній опір тріода. Крутість характеристики S — це відношення приросту анодного струму ΔI_a до приросту анодної напруги ΔU_a :

$$S = \Delta I_a / \Delta U_a. \quad (1)$$

Внутрішній опір діода R_i — це відношення приросту анодної напруги до приросту анодного струму ΔI_a :

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a. \quad (2)$$

Потужність, яка розсіюється на аноді,

$$P_a = I_a U_a. \quad (3)$$

Двохелектродні лампи набули широкого застосування для випрямлення змінного струму та детектування модульованих електромагнітних коливань.

Досить часто виникає потреба підсилення змінного струму чи напруги. Для цього використовують трьохелектродні лампи — *тріоди*. В тріодах між анодом і катодом розміщується третій електрод, який дістав назву *керуючої сітки*. Між сіткою і катодом прикладається так звана сіткова напруга. Оскільки сітка розміщена ближче до катода і певною мірою «екранує» вплив анода на катод, то незначна зміна потенціалу на ній досить сильно впливає на величину анодного струму. Отже, якщо на сітку подати навіть невеликий позитивний потенціал — електрони прискорюватимуться, і навпаки, навіть незначний негативний потенціал гальмуватиме електрони. При деякому негативно-му значенні потенціалу електрони практично не досягатимуть анода лампи — кажуть: лампа заперта.

Графіки, які визначають залежність анодного струму I_a від анодної напруги на сітці (U_c) при сталій анодній напрузі ($U_a = \text{const}$), називаються *сітковими характеристиками* лампи (рис. 52).

Для різних анодних напруг U_a запірний потенціал (U_s) різний (рис. 52). Для більших анодних напруг запірний потенціал — більший. Тому для різних значень напруг можна дістати так зване *сімейство сіткових характеристик*, з яких визначаються основні параметри тріода: крутість сіткової характеристики S , внутрішній опір R_i і коефіцієнт підсилення μ .

Для визначення параметрів лампи *методом трьох точок* треба на прямолінійній ділянці двох сіткових характеристик побудувати характеристичний трикутник ABC (рис. 52). Сторона AB визначає зміну напруги на сітці лампи ΔU_c , BC — зміну анодного струму ΔI_a . Визначивши величину $\Delta U_a = U_{a_2} - U_{a_1}$, можна обчислити параметри.

Крутість сіткової характеристики є показником ступеня підсилення лампи і визначається як тангенс кута нахилу характеристики:

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c = CB / AB. \quad (4)$$

Внутрішній опір — відношення приросту анодної напруги до викликаного ним приросту анодного струму (при сталій напрузі на сітці лампи):

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = (U_{a_2} - U_{a_1}) / BC. \quad (5)$$

Коефіцієнт підсилення μ дорівнює відношенню зміни анодної напруги ΔU_a до зміни напруги на керуючій сітці, які спричиняють ту саму зміну анодного струму:

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_c \quad \text{при} \quad I_a = \text{const}. \quad (6)$$

Величина, обернена до коефіцієнта підсилення, називається *проникністю лампи* D :

$$D = 1/\mu.$$

Розглянуті характеристики належать до так званого *статичного режиму* роботи лампи, тобто такого, коли в анодному колі немає анодного навантаження. При наявності анодного навантаження параметри лампи і режими її роботи називають *динамічними*.

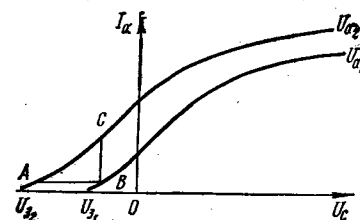


Рис. 52

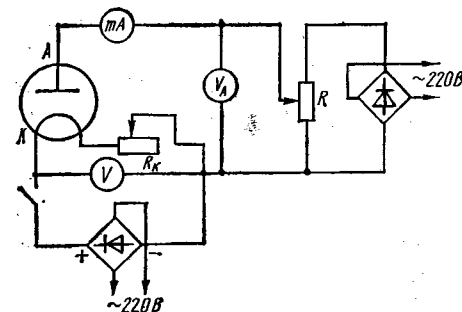


Рис. 53

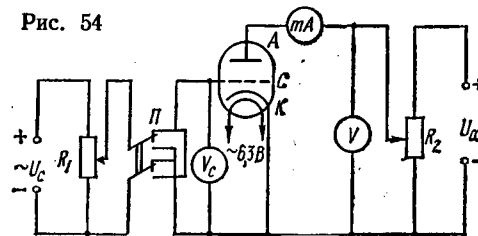


Рис. 54

На рис. 53 наведено схему зняття вольт-амперної характеристики діода і визначення його параметрів. Схема складається з двох незалежних кіл: анодного і кола розжарення катода.

На рис. 54 наведено схему для визначення основних параметрів тріода і зняття анодних та сіткових характеристик. R_1 , R_2 — подільники напруги; Π — перемикач, яким можна змінювати знак потенціалу на сітці лампи.

Завданням даної роботи є дослідження характеристик діода і тріода і визначення їх параметрів.

Порядок виконання роботи

1. Зняти анодну характеристику діода (кенотрона).

1. Скласти коло за схемою рис. 53, дотримуючись полярності.
2. Замкнути вимикачем коло розжарення катода лампи і встановити за допомогою реостата сталу напругу розжарення.
3. Збільшуючи анодну напругу через 5—10 В, зафіксувати покази міліамперметра. Дані занести до таблиці. Стежити, щоб анодний струм досяг максимуму.

4. Побудувати анодну характеристику лампи. Вибрати прямолінійну ділянку на графіку $I_a = f(U_a)$, побудувати трикутник (рис. 52) і визначити крутість та внутрішній опір кенотрона за формулами (1), (2).

II. Зняти характеристику тріода.

1. Скласти коло за схемою рис. 54, дотримуючись полярності.
2. Зняти сіткові характеристики при двох значеннях анодної напруги: 80 і 120 В.
3. Подільником напруги R_1 добитися відсутності анодного струму. Записати покази вольтметра V_c . Потім, збільшуючи напругу на сітці через 0,5—1 В, записати покази міліамперметра в анодному колі. Дані занести до таблиці.
4. Подати на керуючу сітку невеликий позитивний потенціал (наприклад, 2 або 3 В). Змінюючи анодну напругу через 5—10 В,

фіксувати покази міліамперметра в анодному колі. Дані занести до таблиці. Стежити, щоб анодний струм досяг максимуму.

5. Побудувати графіки $I_a = f(U_a)$ та $I_a = f(U_g)$.

6. З графіків сіткових характеристик визначити за формулами (4), (5), (6) параметри лампи.

Контрольні запитання

1. Які будова і принцип дії вакуумного діода та тріода?
2. Які основні параметри діода та тріода?
3. У чому суть явища термоелектронної емісії? Чим визначається термоелектронний струм насичення?
4. Як формулюється закон трьох других? Поясніть його.
5. Яка роль негативного об'ємного заряду («електронної хмарки»)?
6. Яка умова попадання електронів на анод?

11. Дослідження силових характеристик магнітного поля [8—14]

Магнітне поле в речовині характеризується векторами \vec{B} і \vec{H} . Вектор напруженості магнітного поля \vec{H} в деякій точці, який характеризується індукцією \vec{B} і відносною магнітною проникністю μ , — це векторна характеристика цієї точки поля, що визначається як

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu \mu_0. \quad (a)$$

Для визначення індукції магнітного поля електричного струму користуються законом Біо — Савара — Лапласа:

$$d\vec{B} = \mu \mu_0 I dl \sin(\widehat{dl, \vec{r}}) / 4\pi r^2. \quad (b)$$

Для нескінченно довгого провідника маємо:

$$B = \mu \mu_0 2I / 4\pi r_0; \quad H = 2I / 4\pi r_0.$$

Сила, з якою магнітне поле діє на провідник із струмом, розміщений в полі,

$$dF = IBdl \sin(\widehat{dl, \vec{B}}). \quad (b)$$

Напрямок сили \vec{F} визначається правилом лівої руки. Із формули (в) при умові, що кут між напрямом силових ліній магнітного поля і напрямом струму в провіднику дорівнює 90° , дістанемо:

$$B = F / Il. \quad (r)$$

В СІ для напруженості магнітного поля запишемо:

$$H = F / \mu_0 Il. \quad (d)$$

З останньої формули можна визначити напруженість магнітного поля, якщо відомі величини I , l та F .

1. Визначення силових характеристик магнітного поля електродинамометром

Прилади і матеріали: 1) випрямляч ВС4—12; 2) випрямляч типу ВУП; 3) електродинамометр; 4) електромагніт; 5) два амперметри до 2 А типу Э514; 6) повзунковий реостат РСР ($5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$); 7) вимикач.

Опис приладів

В роботі пропонується один із методів визначення напруженості магнітного поля за допомогою електродинамометра. Електродинамометр являє собою пристрій, що складається з каліброваної спіральної пружини, на якій підвішено прямокутну пластмасову пластинку — каркас. До каркаса по периметру прикріплено П-подібний провідник, по якому пропускається струм. П-подібний провідник поміщають в поле електромагніта перпендикулярно до напрямку магнітних силових ліній.

На горизонтальну частину провідника діє сила з боку магнітного поля, яка визначається за законом Ампера. Спіральна пружина при цьому розтягується у вертикальному напрямі. За величиною деформації визначають силу Ампера.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно з рис. 55.
2. Визначити середнє значення коефіцієнта жорсткості пружини при різних навантаженнях за формулою $k = P / (l - l_0)$, де P — вага гир; l_0 — початкове положення покажчика шкали; l — кінцеве положення покажчика шкали при даному навантаженні.
3. Замкнути вимикач 1, встановити струм 0,5—1 А.
4. Замкнути вимикач 2 і встановити струм 1 А такого напрямку, щоб провідник опустився вниз. Визначити величину $l - l_0$.
5. Розрахувати значення сили Ампера за формулою $F = k(l - l_0)$.
6. За формулами (г), (д) розрахувати значення індукції та напруженості магнітного поля.

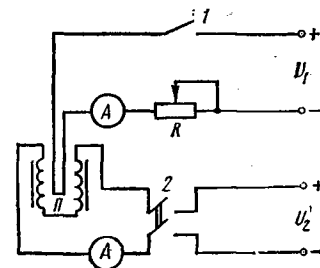


Рис. 55

7. Повторити вимірювання при різних значеннях струму в обмотках електромагніта. Побудувати графік залежності індукції від сили струму.

Контрольні запитання

1. Як формулюється закон Ампера? Запишіть його в загальному та векторному виглядах.
2. Як формулюється закон Біо — Савара — Лапласа?
3. Чи однакові значення напруженості магнітного поля в осерді електромагніта та в просторі між полюсами?

II. Визначення напруженості магнітного поля соленоїда на його осі

Прилади і матеріали: 1) джерело постійного струму (випрямляч типу ВС4—12 або акумуляторна батарея); 2) балістичний гальванометр, наприклад, типу ГЗБ-47; 3) соленоїд з вимірювальною котушкою; 4) амперметр до 5 А типу М104, М109 або Э514; 5) реостат; 6) вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Напруженість магнітного поля на осі соленоїда в загальному випадку визначається за формулою

$$H = In (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) / 2,$$

де I — струм, що проходить по обмотці соленоїда; n — кількість витків на одиницю довжини; φ_1 та φ_2 — кути, під якими з точки спостереження видно радіуси соленоїда поблизу кінців (рис. 56). Коли діаметр і довжина соленоїда сумірні, то такий соленоїд називається коротким.

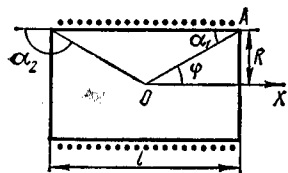


Рис. 56

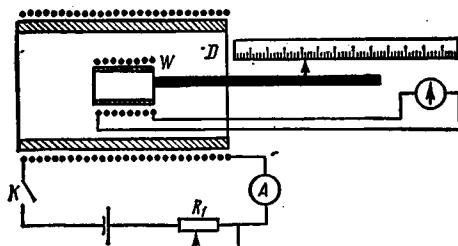


Рис. 57

Для короткого соленоїда напруженість магнітного поля \vec{H} максимальна на осі соленоїда. В решті точок величина \vec{H} менша. Для довгого соленоїда (коли $R \ll l$) $\alpha_1 \rightarrow 0$, $\alpha_2 \rightarrow \pi$ і магнітне поле буде однорідним. Обчислимо напруженість магнітного поля для будь-якої точки на осі соленоїда.

З рис. 56 видно, що

$$\cos \varphi_1 = l/2 \cdot OA = l/\sqrt{l^2 + 4R^2};$$

$$\cos \varphi_2 = -l/\sqrt{l^2 + 4R^2}.$$

Тоді $H = Inl/\sqrt{l^2 + 4R^2}$.

Величина $nl = N$ — повне число витків. Отже,

$$H = IN/\sqrt{l^2 + 4R^2}. \quad (1)$$

Поле багат шарового соленоїда якісно має такий самий характер, як і поле одношарового.

У даній роботі напруженість магнітного поля визначається за допомогою балістичного гальванометра. Схему установки наведено на рис. 57. Балістичний гальванометр приєднується до вимірювальної котушки W . При замиканні вимикача K напруженість магнітного поля на осі соленоїда зростає від нуля до значення H .

Магнітний потік, який пронизує при цьому вимірювальну котушку,

$$\Phi = \mu_0 H S N,$$

де S і N — площа поперечного перерізу і число витків вимірювальної котушки.

У колі котушки W виникає короточасний індукційний струм і рамка гальванометра відхиляється на деякий кут β . Зміщення світлового «зайчика» відраховується по шкалі гальванометра.

Кількість електрики q , що проходить через гальванометр,

$$q = \Phi/R,$$

де R — опір кола гальванометра, Ом;

$$q = \mu_0 H S N / R. \quad (2)$$

З другого боку, кількість електрики q пропорційна величині зміщення стрілки від положення рівноваги α :

$$q = C_q \alpha, \quad (3)$$

де C_q — балістична стала гальванометра.

З формул (2) і (3) маємо:

$$H = R C_q \alpha / \mu_0 S N.$$

Величини S , N , R , C_q залишаються сталими при всіх вимірюваннях, тому введемо позначення:

$$C' = C_q R / S N \mu_0, \quad \text{тоді} \quad C' = H / \alpha, \quad (4)$$

де C' — балістична стала установки.

Після визначення сталої C' установки можна визначити напруженість магнітного поля в будь-якій точці, розміщеній на осі соленоїда:

$$H_x = C' \alpha_x, \quad (5)$$

де індекс x означає координату на осі соленоїда.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно з рис. 57.
2. Розмістити котушку W на осі соленоїда, що відповідає координаті $x = 0$, та встановити реостатом струм у колі заданої величини.
3. Розрахувати напруженість поля на осі соленоїда за формулою (1).
4. Визначити α в момент замикання та розмикання і взяти середнє значення.
5. Користуючись формулою (4), визначити сталу C' .
6. Повторити вимірювання, зазначені в пп. 4, 5, не менш як 3 рази та розрахувати середнє значення.
7. Провести вимірювання в точках соленоїда, розташованих одна від одної на відстані 1 см, до значення $x = 15$ см.
8. Записати для кожної точки значення α_x в таблицю та за формулою (5) розрахувати напруженість поля.
9. Побудувати графік залежності H_x від x .

Контрольні запитання

1. Вивести формулу для напруженості магнітного поля на осі соленоїда.
2. Який вигляд має закон Біо — Савара — Лапласа?
3. Якими якостями повинна характеризуватися вимірювальна котушка?

III. Визначення індукції магнітного поля між полюсами електромагніта за допомогою мілівеберметра

Прилади і матеріали: 1) електромагніт з повітряним проміжком; 2) автотрансформатор типу РНШ-250; 3) випрямляч типу ВС-24М (або ВСА-5); 4) ампервольтметр типу МВА-47/5, або М109; 5) вимірювальна котушка діаметром 0,013 м; 6) мілівеберметр типу М-119; 7) подвійний вимикач.

Опис приладів

Розглянемо соленоїд, в якому зроблено поперечну щілину. Помістимо всередину соленоїда феромагнітне осердя. Напруженість магнітного поля в щілині зростає в μ разів, де μ — магнітна проникність осердя. Оскільки величина μ для феромагнетиків становить 10^3 — 10^5 , то

розміщення такого матеріалу всередині соленоїда дає можливість одержати велике значення напруженості магнітного поля. На цьому принципі і ґрунтується будова електромагнітів. Електромагніт являє собою котушку з феромагнітним осердям і широко застосовується в радіотехніці, телеавтоматиці для створення різних сил тяги, потужних магнітних полів, зокрема в прискорювачах заряджених частинок, для перетворення електричної енергії на механічну в спеціальних механізмах тощо. Практично за допомогою електромагнітів із залізним осердям можна утворити поля з індукцією до 1 Тл.

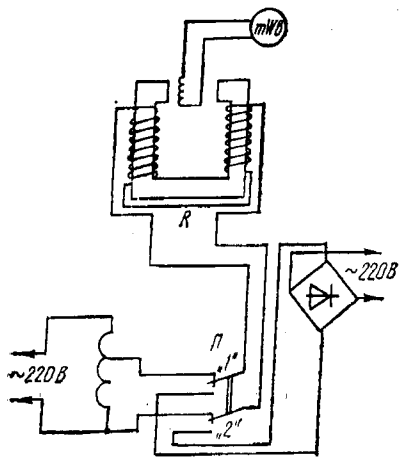


Рис. 58

Електромагніти поділяють на три великі групи:

змінного струму (в яких магнітний потік створюється змінним струмом);

постійного струму (магнітний потік створюється постійним струмом);

поляризовані (в яких поряд з робочим магнітним потоком існує ще й поляризуючий магнітний потік, створюваний постійним магнітом).

Магнітне коло електромагнітів (які мають вигляд тороїда) розраховується за допомогою формули Гопкінсона, з якої можна дістати вираз для значення магнітної індукції в повітряному зазорі:

$$B = \mu_0 IN/l,$$

де I — сила струму; N — загальне число витків тороїда; l — довжина повітряного зазора. Отже, магнітна індукція в зазорі має таку саму величину, яку вона мала всередині тороїда без осердя з кількістю

витків на одиницю довжини, що дорівнює N/l . Тому, зменшуючи зазор, можна утворити досить значні поля.

У даній роботі використовується лабораторний електромагніт і досліджується залежність потоку магнітної індукції в повітряному зазорі від сили струму в обмотці. Схему установки наведено на рис. 58.

Значення магнітної індукції в повітряному зазорі електромагніта знайдемо за формулою

$$B = \Phi/S,$$

де S — площа вимірювальної котушки ($S = \pi D^2/4$); Φ — магнітний потік.

Магнітний потік розраховується за формулою

$$\Phi = c(\alpha_1 - \alpha_2)/N,$$

де c — стала приладу ($c = 10^{-4}$ Вб/под.); N — число витків вимірювальної котушки ($N = 30$); α_1 — початковий показ мілівеберметра у поділках шкали при встановленому струмі в обмотці електромагніта; α_2 — показ приладу при зменшенні магнітного потоку через котушку до нуля (при розмиканні кола). Тоді формула для визначення індукції матиме вигляд:

$$B = c(\alpha_1 - \alpha_2)/NS. \quad (1)$$

Введемо позначення $c/NS = c_0$. Величина c_0 є сталою при всіх вимірюваннях. Остаточно маємо:

$$B = c_0(\alpha_1 - \alpha_2). \quad (2)$$

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою рис. 58.
2. Усунути залишкове намагнічення осердя. Поставити перемикач в положення «1», подати змінну напругу 80—100 В на час 60—90 с, після чого поступово зменшити її до нуля.
3. Поставити перемикач в положення «2». Подати струм 1 А. Зафіксувати початкове відхилення α_1 стрілки. Розімкнути перемикач в нейтральне положення і знову зафіксувати відхилення стрілки α_2 . Вимірювання повторити три рази і взяти середнє значення.
4. Струм збільшувати через 1 А до значення 10—12 А. Для кожного значення сили струму повторити вимірювання, як описано в пп. 2, 3.
5. Для кожного значення струму розрахувати за формулою (1) або (2) значення індукції магнітного поля в повітряному зазорі.
6. Побудувати графік.
7. Обчислити похибки вимірювань величини B для струмів 1,5 та 10 А.

Контрольні запитання

1. Дати означення магнітного потоку, магнітної індукції, напруженості магнітного поля.
2. В яких одиницях вимірюються індукція і напруженість магнітного поля в СІ? Дати їх означення.
3. Де застосовуються електромагніти? Яка їх будова?
4. Як формулюються закони магнітних кіл?

IV. Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі

Прилади і матеріали: 1) джерело постійного струму типу ВС4—12; 2) тангенс-гальванометр; 3) амперметр до 0,5 А типу Э513 або МВА47/5; 4) реостат типу РПШ-5 або РСР до 3 А; 5) двополюсний перемикач.

Теоретичні відомості та опис приладів

Земля являє собою величезний магніт. Магнітні полюси Землі не збігаються з географічними. Південний полюс магнітного поля Землі знаходиться біля північних берегів Америки, близько 75° північної широти і 101° західної довготи, а північний полюс — в Антарктиді, від 67° південної широти і 140° східної довготи (положення магнітних полюсів Землі з часом повільно змінюється).

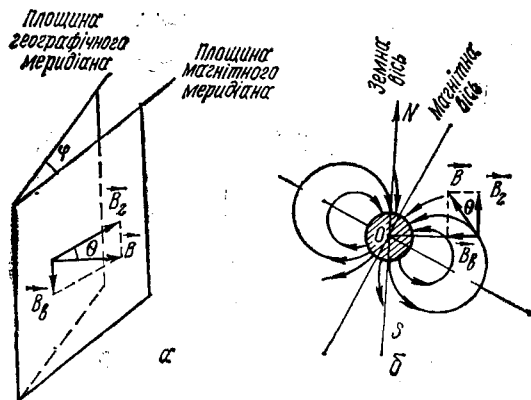


Рис. 59

Існування магнітного поля Землі безпосередньо підтверджується відхиленням магнітної стрілки при її вільному підвісі. При цьому остання встановлюється у напрямі дотичної до лінії індукції магнітного поля Землі. Значення індукції \vec{B} магнітного поля Землі невеликі і змінюються від $0,42 \cdot 10^{-4}$ Тл на екваторі до $0,70 \cdot 10^{-4}$ Тл поблизу магнітних полюсів.

Основними параметрами магнітного поля Землі є: магнітне нахилання θ (кут між напрямом вектора \vec{B} і площиною горизонту (рис. 59, а)), магнітне схилання φ (кут між горизонтальною складовою вектора \vec{B} і площиною географічного меридіана) і горизонтальна складова індукції магнітного поля Землі \vec{B}_r .

Географічний меридіан — напрям, що визначає дійсне положення лінії північ — південь у певній місцевості.

Магнітний меридіан — уявна лінія на земній поверхні, що збігається з напрямом земного магнітного поля (напрям стрілки компаса збігається з напрямом магнітного меридіана).

У першому наближенні магнітне поле Землі можна уявити як поле однорідно намагніченої кулі. На магнітних полюсах магнітне нахилен-

ня дорівнює $\theta \pm 90^\circ$. Тому повна індукція і вертикальна складова магнітного поля мають однакові значення — магнітна стрілка встановлюється у вертикальному положенні.

На магнітному екваторі ($\theta = 0^\circ$) повна індукція \vec{B} і горизонтальна складова \vec{B}_r дорівнюють одна одній — магнітна стрілка встановлюється у горизонтальному положенні.

Схематично поле Землі зображено на рис. 59, б. Насправді ж поле має досить складний характер.

Горизонтальну складову \vec{B}_r визначають за допомогою приладу, що називається тангенс-гальванометром. Він складається з колової рамки, розміщеної вертикально в площині магнітного меридіана. У центрі рамки на вертикальній осі закріплено невелику магнітну стрілку, яка може вільно обертатися тільки в горизонтальній площині. Вона повинна бути настільки малою, щоб можна було вважати індукцію, яка діє на полюси стрілки, такою, що дорівнює індукції в центрі колового струму.

При пропусканні струму через рамку магнітна стрілка зазнає дії двох магнітних полів, а саме — магнітного поля Землі (йдеться про горизонтальну складову B_r , оскільки вертикальна складова зрівнюється реакцією опори стрілки) і магнітного поля струму з індукцією B , що проходить через рамку тангенс-гальванометра.

Під дією цих полів магнітна стрілка встановлюється остаточно в певному напрямі під кутом α до напрямку магнітного поля Землі (рис. 60). Тоді маємо: $B_r = B \operatorname{ctg} \alpha$, де B — індукція магнітного поля струму.

Індукція магнітного поля в центрі контура

$$B = \mu_0 n I / 2R,$$

де n — число витків контура; I — сила струму, що проходить через контур; R — радіус контура. (Величини n і R зазначено на приладі. В даній роботі $r = 0,1$ м, $n = 80$ витків.)

$$B_r = \mu_0 n I \operatorname{ctg} \alpha / 2R. \quad (1)$$

З формули (1):

$$I = 2B_r R / \mu_0 n \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2)$$

Величина $C = 2B_r R / \mu_0 n$ називається сталою тангенс-гальванометра. Тоді

$$I = C / \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2)$$

Якщо $\alpha = 45^\circ$, то $I = C$. Отже, стала тангенс-гальванометра чисельно дорівнює струму, при якому магнітна стрілка тангенс-гальванометра повертається на кут 45° . Остаточно робоча формула матиме вигляд:

$$B_r = \mu_0 n C / 2R. \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло згідно з схемою, наведеною на рис. 61.
2. Повертаючи підставку тангенс-гальванометра, розташувати колову рамку в площині магнітного меридіана. При цьому один з

полюсів магнітної стрілки знаходиться проти нульової поділки шкали. Закріпити підставку в такому положенні.

3. Визначити сталу тангенс-гальванометра. Для цього:

а) замкнути коло і домогтися, щоб стрілка повернулась на кут 45° . Зафіксувати значення сили струму і за формулою (2) розрахувати сталу C ;

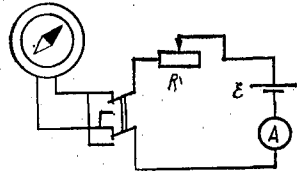


Рис. 61

б) змінити напрям струму і провести аналогічні вимірювання;

в) виконавши вимірювання по три рази, взяти середнє значення C .

4. Визначити горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі за формулою (3). (Доцільно також визначити середнє значення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі за формулою (1) для кількох значень сили струму.)

5. За кутом магнітного нахилання θ для даної місцевості визначити повну індукцію магнітного поля (рис. 60).

6. Розрахувати похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте основні параметри земного магнетизму.
2. Які будова і принцип дії тангенс-гальванометра?
3. Чому B_r найкраще вимірювати при кутах відхилення 45° ?
4. Де знаходиться північний (магнітний) полюс Землі?

V. Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки і магнетрона

Прилади і матеріали: I. 1) осцилограф типу ОЕШ навчальний; 2) випрямляч типу ВС4-12; 3) амперметр до 5 А; 4) кільцева котушка ($r = 0,25$ м, $n = 15$ витків).

II. 1) магнетрон (електронна лампа СО-118 або 2Ц2С в соленоїді); 2) випрямляч типу ВУП; 3) селеновий випрямляч типу ВСА-5; 4) повзункові реостати типу РПШ або РСП ($R_1 = 5 \cdot 10^3$ Ом, $R_2 = 5 \cdot 10^3$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $I = 0,2$ А), R_4 — магазин опорів типу КМС-4 або типу МСР-60, Р-33; 5) вольтметри типу Э515 з межами вимірювання: $V_1 = 150-300$ В, $V_2 = 150-300$ В, $V_3 = 7,5-15-30-60$ В; 6) амперметри типу Э514 до 10 А; 7) міліамперметр типу МА-11/5 або М253; 8) перемикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Питомим зарядом електрона називається відношення заряду до його маси (e/m). Визначити питомий заряд електрона можна, досліджуючи його рух в поперечних електричних і магнітних полях. Нині відомо багато різних методів вимірювання питомого заряду електрона. Найпростішими є такі, що ґрунтуються на відхиленні пучка електронів у магнітному полі.

В даній роботі відношення e/m визначається двома методами: 1) *методом електронно-променевої трубки*; 2) *методом магнетрона*. На рис. 62 наведено принципіальну схему для визначення питомого заряду методом електронно-променевої трубки.

На електрон, який рухається в однорідному магнітному полі, діє сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e[\vec{v}\vec{B}].$$

При відсутності магнітного поля електрони рухаються прямолінійно. Якщо замкнути вимикач K , то траєкторія руху електронів буде вже криволінійною. Індукція магнітного поля в центрі колової котушки, яка складається з n витків,

$$B = \mu_0 I n / 2R, \quad (1)$$

де R — радіус витка; I — сила струму в котушці; n — кількість витків.

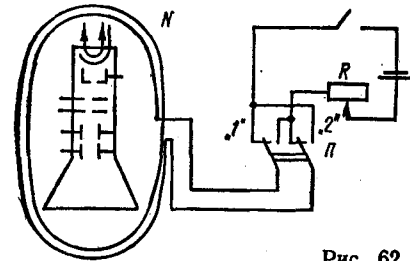


Рис. 62

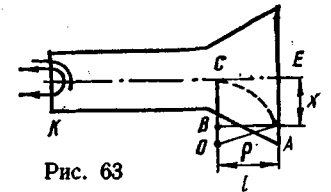


Рис. 63

Оскільки роль доцентрової сили виконує сила Лоренца, то при $\vec{v} \perp \vec{B}$ маємо:

$$evB = mv^2/\rho \quad \text{або} \quad e/m = v/\rho B, \quad (2)$$

де ρ — радіус кривизни траєкторії руху електронів. Визначивши v^2 з рівності $mv^2/2 = eU$ (де U — різниця потенціалів у просторі катод — анод) і підставивши в попереднє рівняння (2), дістанемо:

$$e/m = 2U/\rho^2 B^2$$

або з врахуванням (1):

$$e/m = 8UR^2/\mu_0^2 I^2 n^2 \rho^2.$$

Як визначається радіус кривизни траєкторії, видно з рис. 63: $OB = \sqrt{\rho^2 - l^2}$; $OB = \rho - x$, прирівнявши праві частини, маємо:

$$\rho = (x^2 + l^2)/2x,$$

де x — зміщення світної плями на екрані осцилографа під дією магнітного поля. Остаточнo:

$$e/m = 32UR^2 x^2 / \mu_0^2 I^2 n^2 (x^2 + l^2). \quad (3)$$

На рис. 64 наведено принципіальну схему для визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.

Електронну лампу (типу СО-118 або 2Ц2С) поміщаємо всередину довгого соленоїда. Особливістю цих ламп є те, що катод і анод виготовлені у вигляді двох співвісних циліндричних поверхонь.

Розглянемо характер руху електронів у лампі. Коли в соленоїді немає магнітного поля ($B = 0$), електрони рухаються від катода до

анода у радіальному напрямі вздовж силових ліній електричного поля (рис. 65, а).

При накладанні магнітного поля соленоїда $0 < B < B_{кр}$, напрямленого вздовж осі лампи (тобто такого, напрям напруженості якого збігається з напрямом нитки розжарення катода), на електрони починає діяти сила Лоренца. Траєкторія руху електронів стає криволінійною (рис. 65, б). При збільшенні індукції магнітного поля радіус кривизни

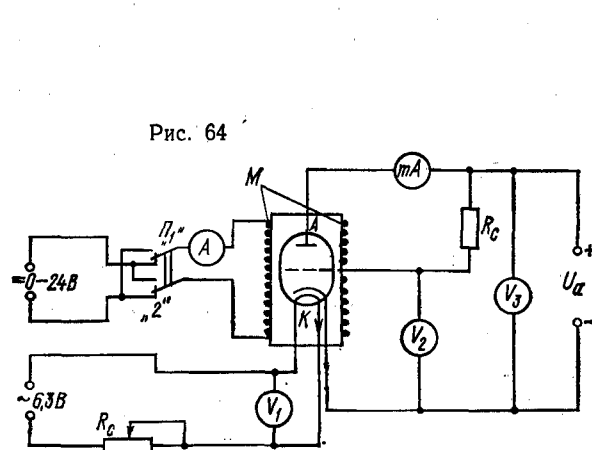


Рис. 64

траєкторії електронів зменшується і при $B = B_{кр}$ набуває такого значення, коли електрони не досягають анода (рис. 65, в). Конфігурація електричного і магнітного полів у даному випадку нагадує конфігурацію схрещених полів у магнетронах — генераторах електромагнітних коливань в області надвисоких частот. Звідси і походить назва методу.

Виводячи робочу формулу, виходимо з диференціального рівняння руху електрона під дією електричного і магнітного полів:

$$m \frac{d^2 \vec{\rho}}{dt^2} = \vec{F} + \vec{F}_m.$$

Розв'язок цього рівняння для відношення e/m має вигляд:

$$e/m = 8U/a^2 B_{кр}^2 (1 - k^2/a^2)^3, \quad (4)$$

де U — анодна напруга; $B_{кр}$ — критична індукція магнітного поля ($B_{кр} = \mu_0 n_0 I_{кр}$); k , a — радіуси катода і анода.

Критична індукція в даній роботі визначається за різким зменшенням анодного струму ($I_{кр}$) на кривій залежності I_a від індукції магнітного поля B при сталій анодній напрузі (це так звана *скидова характеристика лампи*).

Використовуючи лампу СО-118, треба запобігти впливу сітки на анодний струм. Для цього сітку приєднують до анода через великий опір, який вибирається так, щоб сітка дістала потенціал, близький до значення потенціалу анода в місці розміщення сітки. Потенціал сітки

$$U_c = bU_a,$$

де b — коефіцієнт, що визначається відносними відстанями між катодом, сіткою і анодом за такою формулою:

$$b = (\ln k - \ln c) / (\ln k - \ln a),$$

де k , a , c — відповідно радіуси катода, анода, сітки, які можна *визначити* виміряти за допомогою інструментального мікроскопа (в нашій роботі $k = 1,01$ мм, $a = 9,25$ мм, $c = 6,51$ мм). До початку роботи підрахувати число витків соленоїда на одиницю довжини (n_0).

Порядок виконання роботи

I. Визначити e/m методом електронно-променевої трубки.

1. Скласти схему за рис. 62.
2. Встановити світну пляму на екрані осцилографа в центрі координатної сітки. Перемикач поставити в положення «1».
3. Замкнути вимикач та визначити зміщення x світної плями. Дослід виконати при струмах 3, 4, 5 А. Розрахунок e/m провести за формулою (3). Напругу на анод електронно-променевої трубки для осцилографів типу ОЕШ (осцилограф електронний шкільний) можна взяти 2000 В, відстань $l = 0,29$ м.
4. Перевести Π в положення «2» і виконати вимірювання, як в п. 3.
5. Визначити середнє значення величини e/m та підрахувати похибки вимірювання.

II. Визначити e/m методом магнетрона.

1. Скласти схему за рис. 64.
2. Включити живлення нитки розжарення катода лампи. Встановити напругу 3,5 В; підтримувати її сталою за допомогою реостата.
3. Побудувати скидову характеристику лампи $I_a = f(I)$ соленоїда при значенні анодної напруги 60, 70, 80 В.
4. Обчислити критичну індукцію $B_{кр}$ для сили струму соленоїда, при якому скидова характеристика починає «спадати».
5. Обчислити за формулою (4) відношення e/m .
6. Змінити напрям струму в соленоїді та повторити вимірювання відповідно до пп. 3, 4, 5.
7. Обчислити середнє значення питомого заряду, розрахувати похибки, порівняти з табличним значенням, зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які фізичні основи принципу роботи магнетрона?
2. Що називають скидовою характеристикою магнетрона?
3. Які сили діють на електрон, що рухається в магнітному полі?
4. Як визначити індукцію магнітного поля соленоїда?
5. Чому скидові характеристики не дають різкого «вертикального» зменшення сили анодного струму при значенні $H_{кр}$?
6. Які переваги та недоліки кожного з методів вимірювання відношення e/m ?

12. Дослідження магнітних властивостей речовини [8—14]

Усі речовини за магнітними властивостями можна поділити на дві групи: *сильномагнітні* та *слабкомагнітні*. До *сильномагнітних* належать феромагнетики, феримагнетики (або ферити) і антиферомагнетики. До *слабкомагнітних* належать парамагнетики і діамагнетики.

Феромагнетизм — це особливий стан деяких парамагнетиків, який характеризується сильною намагніченістю в слабких магнітних полях. Типовими представниками феромагнетиків є залізо, нікель, кобальт. Крім того, феромагнітні властивості притаманні деяким сплавам з неферомагнітних компонентів, в основі яких — марганець і хром. Характерною особливістю феромагнетиків є складна нелінійна залежність індукції і намагніченості магнітного поля від напруженості. Цю залежність вперше систематично дослідив для заліза О. Г. Столетов. Ще однією характерною особливістю феромагнетиків є існування так званого *магнітного гістерезису*. Суть його полягає в тому, що магнітна індукція у феромагнетика визначається не лише значенням напруженості поля в даний момент, а й попередньою історією намагнічення феромагнітного зразка.

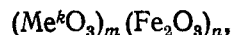
Феромагнітний стан речовини існує лише при температурах, які менші за *температуру (точку) Кюрі*. При переході через точку Кюрі феромагнетик стає парамагнетиком. Магнітна сприйнятливості для феромагнетиків підлягає закону Кюрі — Вейсса:

$$H = c/(T - T_K),$$

де c — стала, що залежить від природи феромагнетика.

Останнім часом широкого застосування набули хімічні сполуки оксиду заліза (III) з оксидами інших металів. Такі сполуки дістали назву феритів.

Загальна формула феритів



де Me — метал (наприклад, Fe, Mn, Zn, Ni і т. д.); k — валентність; m і n — цілі числа.

Для феритів характерне високе значення магнітної проникності. Ферити широко використовуються в техніці як магнітні антени, осердя трансформаторів, дроселів, високочастотних магнітопроводів тощо.

1. Визначення магнітної проникності феритів

Прилади і матеріали: 1) два тороїди на панелі; 2) прилад для вимірювання індуктивностей та ємностей типу Е12—1А.

Теоретичні відомості та опис приладів

Ферити, завдяки високій магнітній проникності (до $5-6 \cdot 10^3$), малим втратам на перемагнічення, великим питомим опорам (порядку $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), малим втратам на струми Фуко у високочастотних полях, знайшли широке застосування в радіотехніці. Феритові осердя використовуються в радіолокаційній, електроакустичній та іншій радіоапаратурі, в електролічильних машинах.

Розглянемо один з методів вимірювання магнітної проникності феритів.

Індуктивність котушки із замкненим осердям у вигляді тороїда визначається так:

$$L = \mu \mu_0 n^2 V.$$

Якщо виготовити з різних матеріалів два однакових за розмірами тороїди і намотати на них однакову кількість витків дроту, то індуктивності будуть неоднакові внаслідок різної магнітної проникності осердь. Для першого тороїда $L_1 = \mu \mu_0 n_1^2 V_1$, для другого $L_2 = \mu_x \mu_0 n_2^2 V_2$. Якщо ж $n_1 = n_2$ і $V_1 = V_2$, то

$$L_1/L_2 = \mu/\mu_x; \quad \mu_x = \mu L_2/L_1, \quad (1)$$

і тому для визначення початкової магнітної проникності феритового осердя досить виміряти індуктивність двох однакових за розмірами котушок, одна з яких з феритовим осердям (μ_x), друга — з немагнітного матеріалу (μ).

У даній роботі пропонується за допомогою приладу Е12—1А виміряти індуктивності котушок і розрахувати магнітну проникність феритового осердя.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з порядком роботи на приладі для вимірювання ємностей і індуктивностей Е12—1А.

2. Під'єднати до вимірних клем приладу спочатку першу, потім другу котушку і виміряти індуктивності L_1 та L_2 .

3. Обчислити за формулою (1) магнітну проникність феритового осердя.

Контрольні запитання

1. Які речовини називають феромагнетиками?
2. Якими параметрами характеризуються ферити?
3. Де застосовуються ферити?
4. Дайте означення одиниці індуктивності в СІ.

II. Визначення точки Кюрі феромагнітних сплавів металів

Прилади і матеріали: 1) електропіч з вимірювальною обмоткою та феритовим осердям; 2) мікроамперметр (або чутливий міліамперметр) з діодом типу Д220 (Д7Г); 3) хромель-алюмелева або мідь-константанова термopapa і таблиці значень ϵ . р. с.; 4) цифровий вольтметр типу В7—20 або потенціометр для вимірювання ϵ . р. с. термopapи типу ПП-63; 5) секундомір; 6) джерело живлення електропечі (РНШ-250).

Теоретичні відомості та опис приладів

Схему установки для визначення точки Кюрі феромагнетика наведено на рис. 66. Електропіч являє собою циліндричний соленоїд, всередині якого знаходиться феритове осердя F . На зовнішньому циліндрі намотано вимірювальну котушку. Магнітний потік в осерді змінюється за синусоїдним законом зміни струму в первинній обмотці (I). E . р. с. індукції, яка виникає в первинній обмотці,

$$\mathcal{E}_1 = I_1 R_1 - U_1, \quad (1)$$

де $I_1 R_1$ — спад напруги на омичному опорі обмотки; U_1 — ефективне значення напруги на вході обмотки. У вимірювальній обмотці II

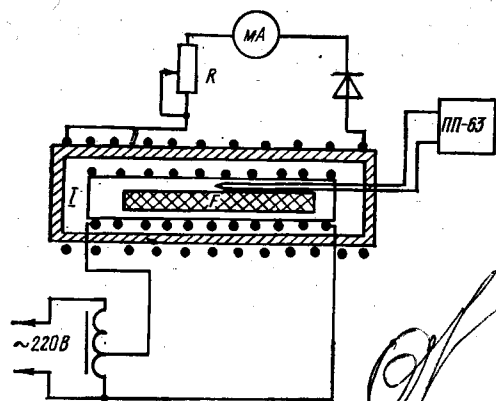


Рис. 66

під дією того самого за величиною магнітного потоку виникає е. р. с.

$$\mathcal{E}_2 = N_2/N_1, \quad (2)$$

де N_1 і N_2 — кількість витків у первинній і вторинній обмотках.

З формули (1) маємо, що при $I_1 R_1 = U_1$ е. р. с. індукції у вимірювальній обмотці дорівнює нулю. Ця умова виконується при температурах Кюрі. При температурах, близьких до точки Кюрі, магнітна проникність феритового

осердя різко спадає. Магнітний потік теж зменшується і величина \mathcal{E}_1 (а отже, і у вторинному колі \mathcal{E}_2) теж спадає до нуля, що і фіксується показами міліамперметра. Температуру, при якій відбувається зменшення струму, вимірюють за допомогою термопари. Для неперервного спостереження за зміною е. р. с. термопари в роботі використовується універсальний цифровий вольтметр типу В7—20.

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою рис. 66.
2. Увімкнути струм живлення електропечі (напруга вказується окремо).
3. Включити секундомір і одночасно занести до таблиці покази міліамперметра та е. р. с. термопари.
4. Покази міліамперметра та відповідні значення е. р. с. фіксувати одночасно через кожні 15—20 с.
5. Коли струм міліамперметра почне зменшуватися, відліки проводити через 3—5 с.
6. Нагрівання припинити, коли струм перестане зменшуватись.
7. Охолодити зразок на 15—20 К і повторити ще раз зазначене в пп. 3—6.
8. Побудувати криву залежності зміни струму від часу та зміни температури від часу. Визначивши момент різкого зменшення струму, за другим графіком визначити температуру Кюрі.

Контрольні запитання

1. Чому при певних температурах феромагнетики втрачають характерні для них властивості?
2. Дайте означення точки Кюрі.
3. На яких фізичних законах ґрунтується розглядуваний метод визначення точки Кюрі?
4. У чому полягає суть доменної структури феромагнетика?

III. Дослідження магнітострикції нікелю

Прилади і матеріали: 1) довгий соленоїд з нікелевим стержнем; 2) відліковий пристрій; 3) освітлювач з шкалою; 4) амперметр типу Э514 до 5 А; 5) перемикач струму; 6) реостат типу РПШ або РСІ; 7) випрямляч типу ВУП та регулятор напруги типу РНШ-250; 8) подвійний перемикач.

Теоретичні відомості та опис приладів

Магнітострикцією називається зміна розмірів і форми тіла при його намагнічуванні. Магнітострикція властива всім тілам, але більш-менш значна вона лише у феромагнетиків.

Для феромагнітних тіл і феритів відносно видовження як міра магнітострикції $\Delta l/l$ може досягати 10^{-5} і навіть 10^{-3} .

Можливі два типи магнітострикційних деформацій кристалічної решітки: за рахунок зміни магнітних сил взаємодії всередині феромагнетику і за рахунок зміни обмінних сил.

Мінімуму енергії немагнітного магнетику відповідають певні відстані між вузлами кристалічної решітки. Під дією зовнішнього магнітного поля відбувається зміна енергії магнетику внаслідок взаємодії магнітних моментів частинок речовини з магнітним полем. Це приводить до зміни рівноважних відстаней між вузлами кристалічної решітки і, отже, до зміни розмірів і форми зразка.

Феромагнетики відрізняються від інших магнітних речовин не лише величиною магнітострикції, а й характером її залежності від напруженості магнітного поля. Так, у пермалою магнітострикція позитивна (тіло видовжується), у нікелю — негативна (тіло скорочується). Існує і обернене до магнітострикції явище, яке полягає у тому, що при механічній деформації тіла змінюється стан намагніченості феромагнетику (магнітопружний ефект). Докладно пояснити явище магнітострикції можна лише на основі квантової механіки.

Це явище знайшло широке застосування в сучасній техніці. Якщо нікелевий стержень помістити в змінне магнітне поле, то розміри стержня змінюватимуться з частотою зміни магнітного поля. При зміні поля утворюються механічні коливання із звуковою або ультразвуковою частотою. Тому явище магнітострикції використовують для створення потужних випромінювачів ультразвукових коливань. Останнім часом явище магнітострикції широко використовують у магнітострикційних фільтрах радіочастот, реле, датчиках вимірювання тиску і т. д.

Найкращим матеріалом для магнітострикційних випромінювачів є нікель, сталь і деякі сплави.

Метою даної роботи є вивчення залежності $\Delta l/l_0 = f(H)$.

Для вимірювання магнітострикції широкого застосування набули методи, засновані на принципі механооптичного важеля. Ці методи дають змогу реєструвати відносні зміни зразків порядку 10^{-6} . Радіотехнічні та інтерференційні методи дають ще більшу чутливість, але вони досить складні. Порівняно простим є метод дротяних датчиків (тензодатчиків). Тензодатчик наклеюється на зразок і підмикається в одне із плечей містка Уїтстона. Із зміною магнітного поля змінюються розміри зразка, що приводить до зміни опору датчика і порушення

рівноваги містка. Відносне видовження зразка розраховується за формулою

$$\Delta l/l_0 = c\Delta R/R,$$

де c — стала градування.

В даній роботі використано метод, заснований на принципі механооптичного важеля. На рис. 67, а наведено схему установки, за до-

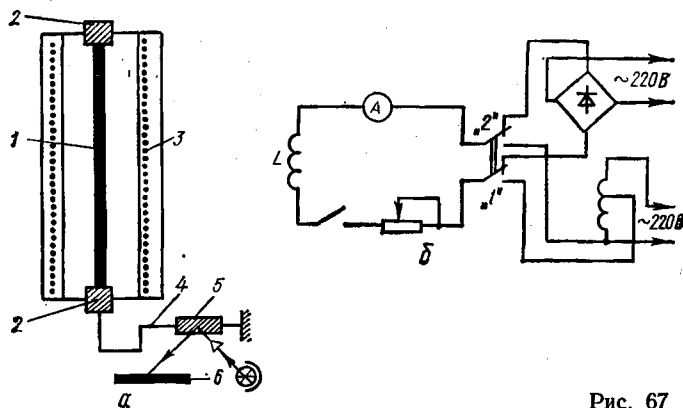


Рис. 67

помогою якої у даній роботі встановлюється залежність $\Delta l/l_0 = f(H)$. Зразок 1 за допомогою спеціальних затискачів 2 кріпиться в соленоїді 3. Механічні коливання зразка передаються через пристрій 4 і перетворюються на обертальні коливання осі, на якій закріплено дзеркальце 5. Коли дзеркальце повертається, світловий промінь переміщується вздовж шкали 6. За кутом повороту дзеркальця можна розрахувати видовження зразка Δl :

$$\Delta l = c\alpha,$$

де c — стала приладу; α — кут повороту. Кут повороту пов'язаний з відстанню L до дзеркала від шкали і переміщенням «зайчика» по шкалі S співвідношенням

$$\alpha = S/2L.$$

Тоді

$$\Delta l/l_0 = cS/2Ll_0. \quad (1)$$

Напруженість магнітного поля розраховується за відомою формулою

$$H = NI/2l, \quad (2)$$

де N — число витків соленоїда; l — його довжина.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричну схему за рис. 67, б.
2. Розмагнітити зразок. Для цього подати змінну напругу (100—150 В) і зменшити її до нуля. Перемикач Π в положенні «1».

3. Перевести перемикач Π в положення «2». При цьому вимикач розімкнений.

4. Замкнути вимикач. Змінювати струм в колі від 0 до 0,7 А через кожні 0,1 А. Положення «зайчика» на шкалі для кожного значення струму записувати до таблиці.

5. Розрахувати відносне видовження $\Delta l/l_0$ за формулою (1) і напруженість H за формулою (2).

6. Побудувати графік залежності відносно видовження від напруженості поля.

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть явища магнітострикції?
2. Які методи застосовуються для вивчення явища магнітострикції?
3. Яке практичне застосування явища магнітострикції?

13. Дослідження квазістаціонарних електричних систем [8, 11—14, 16, 17, заводські інструкції]

Струми називаються *квазістаціонарними*, коли відстань l між найвіддаленішими точками електричного кола, в якому проходить струм, значно менша за довжину електромагнітної хвилі $\lambda = Tv$ (T — період струму; v — швидкість поширення хвилі). Тому технічний змінний струм ($v = 50$ Гц) можна вважати квазістаціонарним. Йому відповідає довжина хвилі $\lambda = 6 \cdot 10^8$ м. Отже, час поширення поля для електротехнічних систем до уваги можна не брати.

Розглянемо коло квазістаціонарного струму, яке складається з послідовно включених омичного опору R , індуктивності L і ємності C . Нехай в колі діє синусоїдна е. р. с. $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t$, де \mathcal{E}_m — амплітуда. Струм у такому колі, спричинений дією змінної е. р. с., являє собою струм вимушених коливань. Силу його можна визначити за формулою

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi), \text{ де} \quad (a)$$

$$I_m = \mathcal{E}_m / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \quad (б)$$

(тут I_m і \mathcal{E}_m — амплітудні значення сили струму і е. р. с. в колі). При цьому повним опором електричного кола змінного струму (імпедансом) є величина

$$Z = \mathcal{E}_m / I_m = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}, \quad (в)$$

де R , $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$ — відповідно опір резистора (активний опір), індуктивний та ємнісний (реактивні) опори. Поняття реактивний походить від слова реакція, що означає процес, який виникає у відповідь на певну зовнішню дію. Між силою змінного струму та напругою в колі має місце зміщення за фазою φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1/\omega C)/R. \quad (г)$$

На основі рівностей (а) — (г) можна проаналізувати окремі випадки кіл змінного струму.

1. $X_L = 0$, $X_C = 0$; $Z = R$. Отже, на ділянці кола, в яку входить тільки резистор, $\text{tg } \varphi_R = 0$, $\varphi_R = 0$. Зміщення за фазою між силою струму і напругою в такому колі змінного струму немає.

2. На ділянці кола, яка містить тільки індуктивність, $\text{tg } \varphi_L = \infty$ і $\varphi_L = \pi/2$. Отже, сила струму за фазою відстає від напруги на $\pi/2$. Якщо $R \neq 0$, то $\text{tg } \varphi = \omega L/R$.

3. На ділянці кола, яка містить тільки ємність, $\text{tg } \varphi_C = \frac{1/\omega C}{0} = -\infty$ і $\varphi_C = -\pi/2$. Отже, сила струму за фазою випереджає напругу на $\pi/2$. Якщо $R \neq 0$, то $\text{tg } \varphi = -1/\omega RC$. Максимальні значення сили струму I_m і напруги U_m пов'язані з ефективними значеннями сили струму $I_{\text{еф}}$ і напруги $U_{\text{еф}}$, які вимірюються електровимірними приладами, такими співвідношеннями:

$$I_{\text{еф}} = I_m/\sqrt{2}; \quad U_{\text{еф}} = U_m/\sqrt{2}.$$

Ефективне (діюче) значення сили змінного струму дорівнює силі постійного струму, який в даному колі створює тепловий ефект, що дорівнює ефектові, створюваному змінним струмом. Більшість електровимірних приладів градується в ефективних значеннях. Досить зручним і наочним способом зображення (подання) величин, які змінюються за гармонічним законом, є метод векторних діаграм. На рис. 68 наведено векторну діаграму для складної ділянки кола змінного струму. Вздовж горизонтальної осі відкладено в умовних одиницях амплітуду сили струму I_m і амплітуду значення напруги на резисторі $U_{mR} = IR$ (бо зсуву фаз між ними немає). Амплітудні значення напруг на котушці індуктивності $I\omega L$ і на конденсаторі $I/\omega C$ відкладено на вертикальній осі. Їх протилежна напрямленість свідчить про те, що напруги на індуктивності і ємності перебувають у протифазах.

Векторні діаграми дають змогу просто одержати основні рівності для розрахунків електричних кіл змінного струму, зокрема рівності (б) — (г).

1. Визначення активного опору, індуктивності і ємності у колі змінного струму

Прилади і матеріали: 1) автотрансформатор типу РНШ-250; 2) випрямляч типу ВУП; 3) батарея конденсаторів від 0,5 до 30 мкФ; 4) котушка індуктивності в дев'ятьма секціями; 5) реостат будь-якого типу на 180 Ом, 1 А; 6) амперметр типу АСТ або Э513 до 1 А; 7) вольтметр типу АСТ або Э515 на 300 В; 8) три двополюсних перемикачі.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, наведеною на рис. 69. Реостат R призначений для зменшення струмів замикання і розмикання, які можуть бути більшими, ніж номінальні значення приладів, увімкнених у коло.

2. Визначити індуктивність котушки за формулою

$$L = \sqrt{R_1^2 - R^2}/\omega,$$

де $R_1 = U_{\text{еф}}/I_{\text{еф}}$, а $R = U/I$ — активний опір. Для цього: а) увімкнути коло постійного струму при введеному повзунку реостата R на максимум опору (перемикач Π_1 в положенні «1»; перемикач Π_2 — в положенні «1»; Π_3 — в положенні «1»). Зменшити опір до нуля, виміряти сили струму I і напруги U , визначити активний опір R ; б) увімкнути коло змінного струму, перемикач Π_1 в положенні «2». Виміряти значення $U_{\text{еф}}$ і $I_{\text{еф}}$, визначити опір $R_{\text{еф}}$ і індуктивність котушки. Вимірювання повторити тричі.

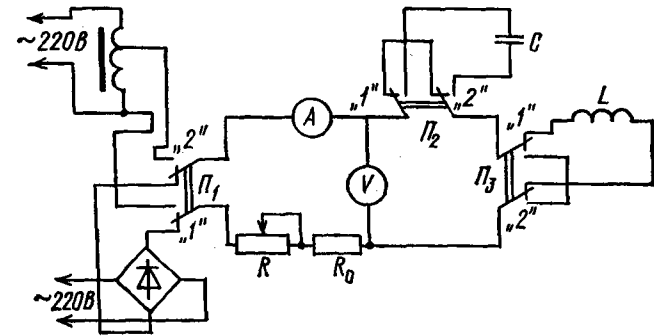


Рис. 69

3. Визначити ємність конденсатора за формулою

$$C = 1/\omega \sqrt{R_2^2 - R^2},$$

де $R_2 = U_{\text{еф}}/I_{\text{еф}}$. Якщо $R = 0$, то формула спрощується:

$$C = 1/\omega R_{2\text{еф}}.$$

Для цього потрібно: а) увімкнути коло змінного струму (перемикач Π_1 в положенні «2», Π_2 , Π_3 — в положенні «2», реостат R в положенні максимального опору); б) виміряти $U_{\text{еф}}$ і $I_{\text{еф}}$, визначити ємність конденсатора. Вимірювання повторити тричі при різних значеннях $U_{\text{еф}}$.

4. Перевірити закон Ома для кола змінного струму (формула (б)) та визначити $\text{tg } \varphi$ згідно з (г). Для цього: а) увімкнути коло змінного струму (перемикач Π_1 в положенні «2», Π_3 — в положенні «1»). Виміряти значення $I_{\text{еф}}$ та $U_{\text{еф}}$ і розрахувати $R_{\text{еф}}$; б) відповідно до (в) обчислити значення Z підстановкою у формулу значень R , L , C ; в) порівняти розрахункові значення $R_{\text{еф}}$ із одержаними з досліду; г) визначити $\text{tg } \varphi$.

5. Накреслити векторні діаграми для кожного з дослідів.

6. Обчислити похибки вимірювань з урахуванням класів точності приладів.

Контрольні запитання

1. Як формулюється закон Ома для змінного струму? Якими величинами характеризується змінний струм?
2. Який вигляд має векторна діаграма закону Ома для змінного струму?
3. Яка відмінність між середніми і діючими значеннями змінного струму?

II. Дослідження послідовного і паралельного резонансу в колі змінного струму

Прилади і матеріали: 1) автотрансформатор типу РНШ-250; 2) три амперметри на 0,5—5 А типу Э513, Э514; 3) три вольтметри на 150—300 В типу Э515; 4) магазин конденсаторів на 50 мкФ; 5) котушка індуктивності від заводського трансформатора ($n = 3400$ витків).

Теоретичні відомості

Резонанс напруг (послідовний резонанс) виникає в колі змінного струму при послідовному з'єднанні ємнісного та індуктивного опорів (навантажень) в режимі, коли $X_L = X_C$ ($\omega L = 1/\omega C$) при невеликому

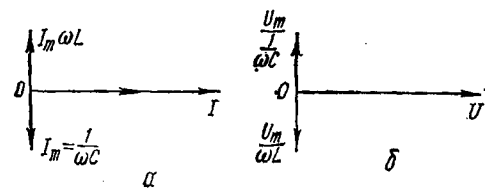


Рис. 70

активному опорі кола. При цьому спади напруг на ємнісному та індуктивному опорах однакові за величиною і протилежні за фазою (рис. 70, а):
 $U_C = I_m/\omega C = U_L = I_m L \omega$. (1)
 Тому їх миттєва сума дорівнює нулю, і вся зовнішня напруга припадає на активний опір, забезпечуючи найбільшу силу струму в колі ($I_m = \mathcal{E}_m/R$). При цьому величини U_C і U_L , зокрема, перевищують прикладену напругу. Така ситуація може бути досягнута шляхом зміни величин L і C , або при сталих L і C — зміною частоти ω змінної е. р. с. При частоті

$$\omega = \omega_p = 1/\sqrt{LC} \quad (2)$$

амплітуда струму максимальна, тобто настає резонанс. Йдеться про послідовний резонанс (резонанс напруг). Частота ω_p , при якій настає резонанс напруг, називається резонансною кутовою частотою. Режим резонансу напруг в техніці сильних струмів є аварійним, оскільки при цьому ізоляція котушок, конденсаторів може бути пробита.

У радіотехніці (високочастотний режим) резонанс напруг є нормативним режимом і використовується для підсилення напруг.

Характерні особливості *резонансу напруг*: імпеданс електричного кола мінімальний і дорівнює активному опору; амплітуда струму максимальна ($I_m)_{\max} = \mathcal{E}_m/R$; амплітуда напруги на активному опорі дорівнює амплітуді прикладеної напруги (е. р. с.): $(U_R)_{\max} = U_{\max}$; між напругою і струмом немає зсуву фаз; потужність джерела струму передається тільки активному опору, корисна потужність змінного струму максимальна.

Враховуючи (1), дістанемо:

$$(U_L)_{\max} = I_m \omega L = \mathcal{E}_m \omega L/R. \quad (3)$$

Отже, значення напруги на індуктивності залежить від величини відношення

$$\omega L/R = Q \quad \text{або} \quad Q = 1/\omega RC. \quad (4)$$

Ця величина називається *добротністю контура*. Для високочастотних режимів $\omega L \gg R$, тому $Q \gg 1$. У цьому випадку резонансна напруга на індуктивності $(U_L)_{\max} = \mathcal{E}_m Q$ і рівна їй напруга на ємності можуть бути набагато більшими за змінну е. р. с. контура. Це явище широко використовується в радіотехніці для налаштування радіоприймачів на радіохвилю певної довжини.

В електричному колі змінного струму при паралельному з'єднанні котушки індуктивності і конденсатора і рівності частоти підключеної напруги і резонансної частоти електричного кола ($\omega = \omega_p$) виникає *резонанс струмів* (паралельний резонанс) (рис. 70, б). Вважатимемо, що активний опір ділянок кола малий і ним можна знехтувати.

Оскільки напруга на обох ділянках паралельного з'єднання однакова, то зсув фаз починається тільки на силах струмів на ділянках кола з індуктивністю і ємністю:

$$I_L = U_m \sin(\omega t - \pi/2)/\omega L,$$

$$I_C = U_m \omega C \sin(\omega t + \pi/2).$$

При реалізації умови $\omega L = 1/\omega C$ струми в обох вітках будуть однакові за величиною, у протилежних фазах і взаємно зрівноважені.

У реальних електричних колах повністю позбавитися активного опору неможливо. Тому при реалізації умови (2) струми у вітках з ємністю і індуктивністю майже протилежні за фазою і мало відрізняються за модулем. При цьому струм у головному провіднику мінімальний, а опір кола максимальний $Z_p = L/CR = \rho^2/R$ (де $\rho = \sqrt{L/C}$ — хвильовий опір контура). Такий випадок називається *резонансом струмів*. Йдеться про встановлення мінімального значення сили змінного струму в нерозгалуженій частині кола при паралельному з'єднанні елементів кола. У контурі з паралельно з'єднаними котушкою індуктивності і конденсатором відбуваються електричні коливання, а також обмін енергіями між котушкою і конденсатором; енергія з контура не вилучається.

Порядок виконання роботи

1. Дослідити резонанс напруг.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 71.
2. Встановити ручку автотрансформатора в нульове положення, встановити початкову ємність 10 мкФ.
3. Встановити на вольтметрі V напругу 60 В.
4. Змінювати ємність через 2—5 мкФ. Для кожного значення ємності покази всіх приладів занести до таблиці.
5. Побудувати графіки залежності

$$I = f(C), \quad V = f(C), \quad V_L = f(C), \quad V_C = f(C).$$

6. Визначити індуктивність котушки, користуючись формулою (2).

7. Визначити добротність контура згідно з формулами (4) і (5).
8. Обчислити похибки вимірювань.
11. Дослідити резонанс струмів.

1. Скласти коло за схемою рис. 72.
 2. Встановити ручку автотрансформатора в нульове положення.
- Встановити початкову ємність батареї конденсаторів 10 мкФ.

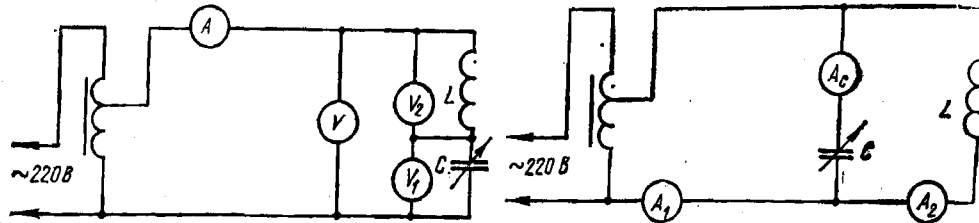


Рис. 71

Рис. 72

3. Змінювати ємність батареї через 3—5 мкФ і для кожного значення ємності покази приладів занести до таблиці.
4. Побудувати графіки залежностей:
 $I = f(C)$, $I_C = f(C)$, $I_L = f(C)$.
5. Визначити резонансну ємність з графіків (їй відповідає мінімум сили струму).
6. Визначити на основі формули (2) індуктивність котушки L .
7. Визначити добротність котушки згідно з формулами (4) і (5).
8. Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Які причини і наслідки резонансу напруг і струмів?
2. Проаналізувати векторні діаграми резонансу напруг і струмів.
3. Що називають добротністю контура?

III. Вивчення лічильника електричної енергії

Прилади і матеріали: 1) однофазний лічильник типу СО-И446 або СО-2М; 2) вольтметр на 150—300 В типу Э515; 3) амперметр на 2,5—5 А типу Э514; 4) ламповий реостат; 5) регулятор напруги типу РНШ-250; 6) секундомір.

Теоретичні відомості та опис приладів

В колах змінного струму в основному застосовуються лічильники індукційної системи. Індукційний лічильник (рис. 73, а) складається з двох електромагнітів 4, 5, між полюсами яких розміщено алюмінієвий диск 3, насаджений на вертикальну вісь 2. Один з електромагнітів 5 має обмотку з товстого ізольованого дроту, яка є обмоткою струму і підключається в коло послідовно з навантаженням. Другий електромагніт 4 має обмотку з тонкого ізольованого дроту (обмотка напруги), що підключається в коло паралельно навантаженню. Змінний струм, проходячи по обмотці струму, створює магнітний потік Φ_1 , а проходячи по обмотці напруги, — магнітний потік Φ_2 . Змінні магнітні

потоки Φ_1 і Φ_2 збуджують вихрові індукційні струми I_1 і I_2 в алюмінієвому диску. При взаємодії магнітного потоку Φ_1 із струмом I_2 , магнітного потоку Φ_2 із струмом I_1 алюмінієвий диск під дією результуючого обертового моменту починає обертатися.

$$M_{об} = k_1 \Phi_{1m} \Phi_{2m} \sin \varphi, \quad (1)$$

де k_1 — коефіцієнт пропорційності; φ — зсув фаз між магнітними потоками. В лічильнику індукційної системи магнітний потік Φ_{1m} пропорційний струмові I_1 , а магнітний потік Φ_{2m} — напрузі в колі U .

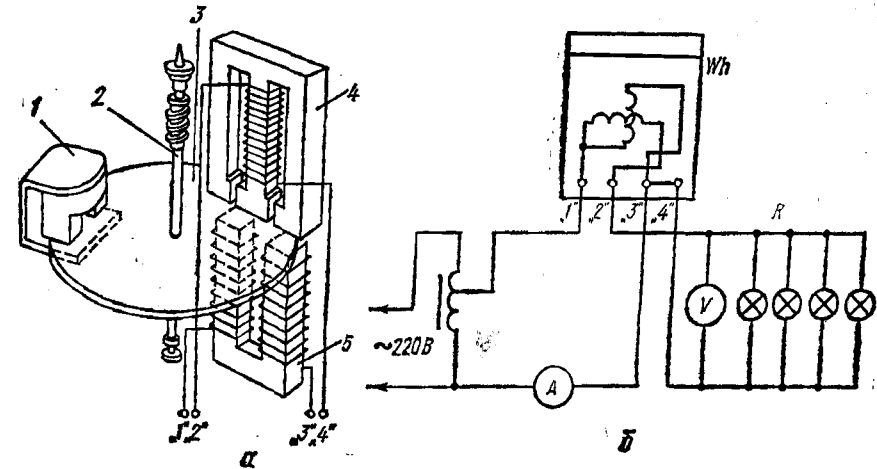


Рис. 73

Тоді з (1) маємо:

$$M_{об} = k_2 I_1 U \sin \varphi. \quad (2)$$

Для прямої пропорційної залежності $M_{об}$ від потужності P потрібно, щоб $\sin \varphi = \cos \varphi$ (φ — зсув фаз в колі між струмом і напругою). Це в конструкції лічильника досягається спеціальними розгалуженнями магнітопровода. Тоді остаточно:

$$M_{об} = k I_1 U \cos \varphi = k P. \quad (3)$$

Наявність у лічильникові постійного магніту 1 створює гальмівний момент алюмінієвого диска аналогічно гальмівному моменту алюмінієвого каркаса в приладах магнітоелектричної системи. Крім цього гальмівного моменту в лічильнику створюється ще два гальмівних моменти від взаємодії електромагнітів з їхніми індукційними струмами.

Результуючий гальмівний момент пропорційний швидкості обертання алюмінієвого диска:

$$M_p = k' n, \quad (4)$$

де n — кількість обертів диска в секунду.

При рівномірному обертанні диска $M_{об} = M_p$. Тоді на основі (3) і (4) дістаємо:

$$P = c n, \quad (5)$$

де $c = k'/k$ — стала лічильника. Помноживши праву і ліву частини (5) на час t , маємо:

$$A = cN, \quad (6)$$

де $A = Pt$ — енергія струму, що споживається, а $N = nt$ — число обертів диска за час t . Остаточна $c = A/N$.

В даній роботі потрібно детально ознайомитися з будовою та принципом дії індукційного лічильника і провести дослідження його роботи.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 73, б. (Фазний провід приєднують до затискача 1, а нульовий провід — до затискача 3; до 2 та 4-го затискачів підмикається навантаження.)

2. Ознайомитися з технічними даними лічильника. Зафіксувати номінальну сталу лічильника c_n (на лічильнику зазначено, скільки обертів диска відповідає 1 кВт · год електроенергії, яка пройшла через лічильник).

3. Визначити відносну похибку лічильника залежно від величини навантаження. Для цього: а) регулятором напруги встановити номінальне значення напруги для даного лічильника; б) ламповим реостатом підібрати навантаження лічильника (контролюється амперметром), яке дорівнює 5 % номінального навантаження лічильника. Підрахувати кількість обертів диска за час $t = 180—240$ с. Дані занести до таблиці; в) повторити спостереження п. б) при навантаженнях лічильника, які дорівнюють 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100 % номінального значення. (Пропонується брати номінальне значення струму 5 А); г) для кожного із спостережень підрахувати дійсну c_d і номінальну c_n сталі лічильника:

$$c_d = A_t/N_t; \quad c_n = A/N,$$

де A_t — робота, яка виконується за час t (виміряне значення); A — одиниця енергії, що вимірюється лічильником за N обертів диска (зазначена на лічильнику); д) визначити для кожного навантаження відносну похибку:

$$\gamma = (c_n - c_d) \cdot 100/c_d, \%$$

Величина c_n стала для всіх вимірювань.

Результати занести до таблиці.

№ пор	Вимірювані величини					Розрахункові величини		
	I, A	U, B	t, c	$N, об$	$A, Дж$	c_n	c_d	$\gamma, \%$

4. Побудувати графік залежності відносної похибки лічильника γ від величини $I \cdot 100/I_n, \%$.

Контрольні запитання

1. Який принцип дії індукційного лічильника електричної енергії?
2. Як підмикати в електричне коло лічильник електричної енергії і яких правил при цьому дотримуватися?
3. Який фізичний зміст сталої лічильника?

IV. Дослідження роботи трансформатора

Прилади і матеріали: 1) трансформатор з кількома обмотками і відомою кількістю витків; 2) вольтметри на 150—300 В і 7,5—300 В типу Э515; 3) амперметр на 0,5—1 А типу Э513 або Э59/3; 4) ватметр на 5 А, 160 В типу Д539/1, Д539/2; 5) реостат до 5 А типу РПШ-5; 6) вимикач.

Теоретичні відомості та опис приладів

Трансформатор — це електромагнітний апарат, призначений для перетворення енергії змінного струму однієї напруги на енергію змінного струму іншої напруги при незмінній частоті струму. Він складається із замкненого осердя і обмоток. Осердя виготовляється з пластин електротехнічної сталі і править за магнітопровід трансформатора. Обмотки розміщені на осерді і виготовляються з ізолюваного дроту у вигляді котушок прямокутної або круглої форми. Обмотка, яка підключається до джерела струму, називається *первинною*. Обмотка, до якої підмикаються приймачі електричної енергії, називається *вторинною*. Вторинних обмоток може бути кілька.

Трансформатори, в яких у вторинних обмотках число витків більше порівняно з первинною, називаються *підвищувальними*.

Нехай N_1 і N_2 — кількості витків у первинній і вторинній обмотках. До первинної обмотки підведено змінну напругу U_1 . Вторинна котушка розімкнена (режим холостого ходу). Первинна обмотка в колі змінного струму утворює значний індуктивний опір, і в ній струм I_0 (холостого ходу) незначний, він відстає від напруги U_1 майже на 90° .

Оскільки осердя замкнене, то розсіювання ліній магнітної індукції в повітрі незначне і можна вважати, що магнітний потік в осерді однаковий для обох обмоток. Цей магнітний потік Φ_0 , пропорційний силі струму I_0 , наводить у первинній обмотці е. р. с. самоіндукції

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -U_1, \quad (1)$$

яка компенсується прикладеною напругою U_1 . Одночасно той самий потік наводить у вторинній обмотці е. р. с. взаємодукції

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -U_2. \quad (2)$$

З формул (1) і (2) дістаємо:

$$U_1/N_1 = \mathcal{E}_1/N_2 = \mathcal{E}_0, \quad (3)$$

де \mathcal{E}_0 — е. р. с., яка припадає на один виток обмоток трансформатора. З формули (1) і (2) маємо:

$$U_1/\mathcal{E}_2 = N_1/N_2 = k, \quad (4)$$

де k — коефіцієнт трансформації; якщо $k > 1$ — трансформатор знижувальний. Величину \mathcal{E}_2 можна виміряти, безпосередньо підключивши вольтметр до клем незамкненої вторинної обмотки ($U_2 \approx \mathcal{E}_2$). У силових трансформаторах спад напруги на активному і індуктивному опорах розсіювання первинної обмотки при холостому ході трансформатора становить 1—2 % підведеної напруги.]

Якщо розглядати навантажений трансформатор (вторинна обмотка замкнена) і знехтувати незначними втратами енергії на ньому, то можна вважати, що потужності в обох обмотках однакові: $I_1 U_1 = I_2 \mathcal{E}_2$, звідки

$$\mathcal{E}_2 / U_1 = I_1 / I_2 = N_2 / N_1.$$

К. к. д. трансформатора η , як і всякої іншої машини, визначається відношенням корисної потужності P_2 до всієї підведеної потужності P_1 :

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (5)$$

Втрати потужності в трансформаторі складаються з втрат у мідних проводах обмоток, пов'язаних з нагріванням провідників обмоток, а також втрат у сталі осердя, зумовлених гістерезисом (перемагніченням) і вихровими струмами в осерді. Останні втрати визначаються величиною і частотою зміни магнітного потоку і від навантаження не залежать. Найбільший к. к. д. мають трансформатори при рівності втрат в сталі і міді. Сучасні силові трансформатори забезпечують к. к. д. 97—98 %. В роботі пропонується визначити коефіцієнт трансформації, к. к. д. трансформатора і його залежність від струму навантаження.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 74.
2. При холостому ході трансформатора (вимикач незамкнений) виміряти величини U_1 і \mathcal{E}_2 . Знаючи кількість витків обмоток N_1 і N_2 , розрахувати на основі формул (3) і (4) е. р. с. \mathcal{E}_0 і коефіцієнт трансформації.

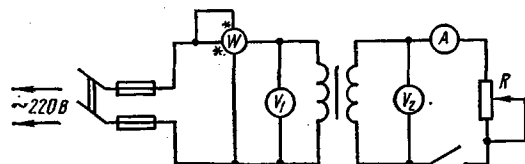


Рис. 74

3. Замкнувши вторинну обмотку при різних навантаженнях в межах номінальних значень струму I_2 , визначити P_1 і P_2 за показами приладів і обчислити за формулою (5) к. к. д. трансформатора.

4. Побудувати графік залежності η (I_2) і встановити, при якому струмі I_2 коефіцієнт корисної дії трансформатора максимальний.

Контрольні запитання

1. Які будова і призначення однофазного трансформатора?
2. Як намотуються первинна і вторинна обмотки трансформаторів?
3. Що називається коефіцієнтом трансформації, к. к. д. трансформатора?
4. Які умови забезпечують максимальний к. к. д. трансформатора?
5. Які втрати енергії у трансформаторі і від чого вони залежать?

14. Дослідження електромагнітних коливань

[14, 17, 18, 21, заводські інструкції]

В електричному колі, яке складається з послідовно з'єднаних котушки індуктивності L , конденсатора C і резистора R , виникають електромагнітні коливання.

Електромагнітні коливання в коливальному контурі є затухаючими. Диференціальне рівняння таких коливань має вигляд

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0.$$

За формою це рівняння аналогічне диференціальному рівнянню вільних механічних коливань будь-якого тягарця на пружині:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} + kx = 0.$$

Ці два рівняння математично аналогічні (йдеться про електромеханічну подібність). Аналогом маси m є індуктивність коливального контура L , коефіцієнта опору α — опір (активний) кола R і аналогом коефіцієнта пружності k є величина, обернена до ємності.

Розв'язки таких рівнянь мають загальний вигляд

$$x = A_0 e^{-\frac{r}{2m}} \sin(\omega t + \varphi).$$

Для електромагнітних коливань

$$I = I_0 e^{-Rt/2L} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$U = U_0 e^{-Rt/2L} \sin(\omega t + \varphi_2). \quad (a)$$

Рівняння (a) описують коливання струму і напруги. Швидкість затухання коливань визначається величиною активного опору кола. Амплітуда струму, як видно з формули (a), дорівнює:

$$I_m = I_0 e^{-Rt/2L} \quad (b)$$

і, отже, зменшується з часом від початкового значення I_0 до нуля за експоненціальним законом.

Величина $\beta = R/2L$ називається *коефіцієнтом затухання*. За час $\tau = 1/\beta$ амплітуда коливань зменшується в e разів. Цей час називають *сталю затухання* коливань у контурі. Мірою затухання коливань також вважають величину відношення двох амплітуд коливань, виміряних через період коливань, і називають її *декрементом* коливань. Частіше затухання коливань оцінюють логарифмічним декрементом затухань:

$$\Delta = \ln(I_m / I_{m_1}) = \beta T. \quad (b)$$

1. Вивчення роботи електронного осцилографа

Прилади і матеріали: 1) осцилограф типу ЭОШ (або СІ—1); 2) звуковий генератор ГЗ-33 (або ГЗ-41); 3) знижувальний трансформатор (220 В/6, 12, 24, 48, 60 В); 4) вимикачі.

Теоретичні відомості та опис приладів

Електронний осцилограф — це прилад для візуального спостереження, вимірювання і запису різноманітних електромагнітних процесів.

Умовно осцилографи можна поділити на такі групи: 1) лабораторні універсальні з чутливістю до сотень міліметрів на вольт (мм/В); 2) про-

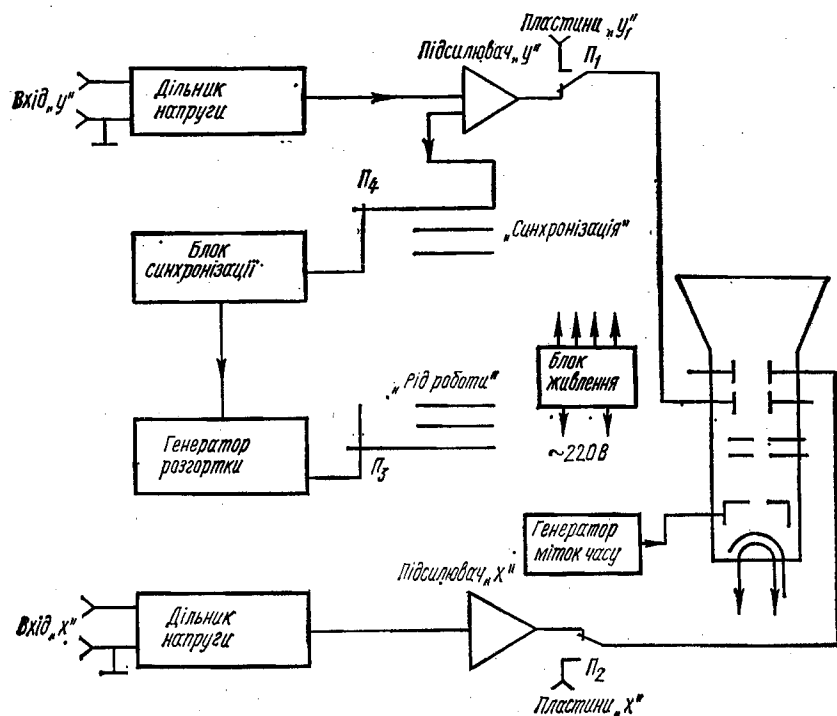


Рис. 75

сті осцилографи з чутливістю від 10 до 100 мм/В; 3) осцилографи для спостереження повільних процесів, в яких використовуються електронно-променевої трубки з великою тривалістю післясвітіння екрана; 4) імпульсні осцилографи для спостереження короткочасних процесів.

Осцилограф складається з електронно-променевої трубки, генератора розгортки, блока синхронізації, двох підсилювачів, блока живлення. Для калібрування масштабу часу в деяких типах осцилографів є генератор міток часу. Блок-схему осцилографа наведено на рис. 75. Осцилографи застосовуються в багатьох галузях науки і техніки, зокрема в електро- і радіотехніці, механіці, акустиці, медицині, біології і т. п. Осцилограф дає змогу спостерігати процеси тривалістю 10^{-8} — 10^{-7} с.

Вимірювальним елементом електронного осцилографа є електронно-променева трубка, всередині якої утворюється електронний пучок, що падає на екран трубки. Розрізняють два типи трубок: з електростатичним фокусуванням електронного пучка і з магнітним фокусу-

ванням. Спрощену схему електронно-променевої трубки наведено на рис. 76. На ній дано і найпростішу схему керування електронним пучком. Основними характеристиками електронно-променевої трубки є чутливість, яка коливається в межах 0,1—1 мм/В; область лінійності; швидкість переміщення плями на екрані, при якій ще спостерігається світіння; розміри екрана; прискорююча напруга; час тривалості післясвітіння. Для випромінювання електронів лише в одному напрямі катод 1 виготовляється у вигляді невеликого металевго циліндра з окремим покриттям з торця. Металевий циліндр насаджений на фарфорову трубку, всередині якої розміщено підігрівну спіраль. Керування електронним пучком здійснюється подільником напруги, до складу якого входять резистори R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 .

Керуючий електрод 2 призначений для регулювання кількості електронів в електронному пучку (регулятор яскравості R_0). Потенціал електрода негативний відносно катода.

Додаткове фокусування (регулятор R_2 — «фокус») електронного пучка і його прискорення здійснюються за допомогою двох циліндричних анодів 3, 4. Підстроювальний резистор R_4 дає змогу встановити потенціал другого анода таким, що дорівнює потенціалу пластин при невідхиленому промені на екрані осцилографа. Другий анод 4 має вищий порівняно з першим потенціал. Внаслідок цього між анодами створюється електричне поле. Повна напруга, яка подається на анод, для звичайних осцилографів коливається в межах 500—5000 В. Для спеціальних цілей застосовують швидкісні осцилографи з прискорюючою напругою від 30 до 100 кВ.

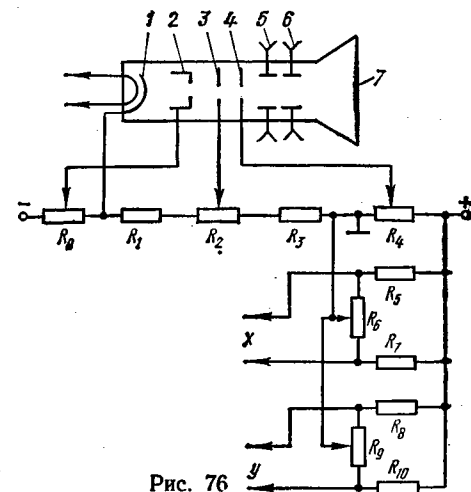


Рис. 76

Система пар відхиляючих пластин 5 і 6, розташованих взаємно перпендикулярно, призначена для відхилення пучка електронів у вертикальному та горизонтальному напрямках. Зміщення пучка здійснюється подачею на вертикально та горизонтально відхиляючі пластини напруг відповідно від подільників R_8, R_9, R_{10} і R_5, R_6, R_7 . Опори R_8 і R_7 дорівнюють один одному, тому при середньому положенні повзунка резистора R_6 (на панелі осцилографа — це регулятор «Зміщення x») потенціал на обох пластинах «x» буде однаковий і промінь не зміщується. При зміщенні повзунка резистора потенціал однієї з пластин зменшується, другої — збільшується на таку саму величину. Між пластинами виникає поле, яке і відхиляє промінь в горизонтальній площині. Аналогічно відбувається і відхилення променя у вертикальній площині (регулятор на панелі осцилографа — «Зміщення y»). Величина зміщення залежить як від значення напруги, прикладеної до пластини, так і від швидкості руху електронів.

Наприклад, якщо одна із напруг пропорційна змінній величині «х», а друга — величині «у», то на екрані осцилографа світна пляма описуватиме деяку функцію $f(x, y)$ в прямокутній системі координат.

Так, для одержання фігур Ліссажу треба до обох пар пластин підвести синусоїдні напруги різної частоти.

Екран електронно-променевої трубки 7 являє собою внутрішню поверхню дна її балона, яка покрита тонким шаром люмінофора (наприклад, сульфідом цинку), здатного світитися в точці, в яку попадає пучок електронів. Чутливість саме електронно-променевої трубки незначна, тому для дослідження слабких сигналів осцилографи мають підсилювачі на входах «Х» і «У». Підсилювачі характеризуються рівномірною частотною характеристикою (тобто незалежністю коефі-

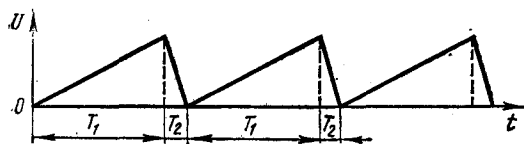


Рис. 77

цієнта підсилення від частоти, широкою смугою пропускання частот — від десятків герц до сотень кілогерц або кількох мегагерц). Коефіцієнт підсилення плавно регулюється за допомогою резистора. Оскільки будь-який підсилювач має обмежений діапазон частот, то в осцилографах, як правило, передбачається подача сигналу безпосередньо на відхиляючі пластини електронно-променевої трубки (перемикачі P_1 і P_2 на рис. 75). Вхідні гнізда пластин розташовані на тильній частині кожуха приладу.

Важливим елементом осцилографа є генератор розгортки. Його призначення — забезпечити рівномірну розгортку електронного пучка на екрані електронно-променевої трубки. Як правило, напруга розгортки, яка використовується в осцилографах, змінюється в часі за лінійним законом (в окремих випадках за синусоїдним). Тому генератор розгортки забезпечує змінну напругу пилкоподібної форми (рис. 77). Ця напруга характерна тим, що протягом досить великого проміжку часу T_1 зростання напруги пропорційне часу, спад же напруги відбувається практично миттєво за час T_2 ($T_2 \ll T_1$). Тому електронний пучок відхиляється в одному напрямі зліва направо пропорційно часу (прямий або робочий хід) і потім миттєво повертається у вихідне положення (зворотний хід). При зворотному ході промінь гаситься і на екрані спостерігається лише прямий хід. Якщо період розгортки великий, то рух світної точки добре помітний на екрані. При малому періоді світний рух дуже часто повторюється, і око людини вже не може розрізнити переміщення променя — на екрані спостерігається неперервна лінія.

Період розгортки можна плавно регулювати ручкою «Частота плавно». Режим роботи встановлюється перемикачем P_3 «Род работы».

Досліджувані сигнал подається на вертикальні пластини, а на горизонтальні пластини подається пилкоподібна напруга. Якщо частота досліджуваної напруги дорівнює f , а частота напруги розгортки f_0 , то на екрані дістаємо певну криву досліджуваного сигналу. Зображення досліджуваного сигналу на екрані нерухоме тоді, коли частоти досліджуваного сигналу і пилкоподібної напруги кратні одна одній. При невиконанні цієї умови зображення на екрані буде рухомих.

Для узгодження частоти досліджуваного сигналу з частотою генератора розгортки застосовується синхронізація частоти генератора розгортки, яка здійснюється від частоти стабільного джерела напруги. Синхронізація може здійснюватися безпосередньо від напруги мережі, від частоти зовнішнього джерела, від частоти внутрішнього джерела напруги (для цього кожен осцилограф має перемикач P_2 «Синхронізація»).

Живлення осцилографа здійснюється від спеціального блока, до складу якого входить цілий ряд пристроїв, що забезпечують нормальну роботу всіх систем.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити заводську інструкцію до осцилографа і, користуючись нею, підготувати осцилограф до роботи.

2. Навчитись виконувати такі операції:

а) дістати на екрані нерухому світну точку та лінію (нерухому яскраву світну точку не рекомендується довго тримати на одному місці екрана, оскільки екран може вигорати);

б) переміщувати точку вертикально, горизонтально, регулювати яскравість точки, фокусувати її;

в) регулювати ступінь підсилення вертикального і горизонтального входів осцилографа.

3. Скласти коло за схемою рис. 78. Подати напругу на вхід «у» та дістати криву промислового струму. Зафіксувати на екрані одну, дві, три повні синусоїди.

4. Визначити залежність довжини світного штриха на екрані ос-

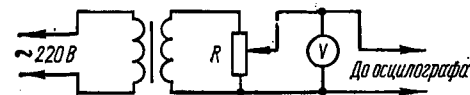


Рис. 78

$f_x : f_y$	0°	45°	90°
1:1			
1:2			
1:3			
2:3			
2:5			

Рис. 79

цилографа від напруги (тут і в пп. 5, 6 використовується схема рис. 78). Подати на вхід «у» осцилографа ряд напруг (не менше 10 значень). При вимкненому генераторі розгортки на екрані з'явиться вертикальна лінія (світний штрих). Виміряти довжину штриха. Вимірювання провести, не змінюючи довільного положення регулятора чутливості. Побудувати графік залежності довжини штриха від напруги.

5. Визначити чутливість входу осцилографа «у» та «х» в залежності від положення ручок регулювання чутливості (вибрати довільно не менш як 10—15 положень кожної ручки). При вимкненому генераторі розгортки виміряти довжину l штриха. Якщо відхилення пере-

більшити радіус екрана, змістити промінь на край екрана і вимірювати максимальне відхилення від цього положення (тобто амплітуду $l/2$).

Чутливість (в міліметрах на вольт (мм/В)) розрахувати за формулою

$$\gamma = l/2 \sqrt{2} U$$

(у формулі враховано, що вольтметри вимірюють ефективні, а осцилографи — амплітудні значення напруги).

Побудувати графік залежності чутливості від положення ручок регулювання чутливості.

6. Визначити чутливість електронно-променевої трубки (по осях y та x). Подати по черзі напругу безпосередньо на вертикально та горизонтально відхиляючі пластини осцилографа. Підрахувати з одержаних у пп. 4 і 5 результатів максимальний коефіцієнт підсилення підсилювачів.

7. Перевірити градування звукового генератора. Подати на одну пару пластин осцилографа напругу від мережі змінного струму (частота 50 Гц), на другу — напругу від звукового генератора. За допомогою фігур Ліссажу (рис. 79) визначити істинні частоти. Скласти таблицю поправок. Зарисувати форму фігур Ліссажу для відношення частот 50 : 50; 50 : 100; 50 : 150; 50 : 200.

Контрольні запитання

1. Які будова і принцип дії електронно-променевої трубки?
2. Які основні блоки осцилографа та яке їх призначення?
3. Який принцип роботи генератора розгортки?
4. Як утворити на екрані осцилографа фігури Ліссажу?
5. Як за фігурами Ліссажу визначити відношення частот?

II. Визначення логарифмічного декременту затухання коливального контура

Прилади і матеріали: 1) електронний осцилограф типу ЕОШ; 2) випрямляч типу ВУП; 3) реостат типу РПШ або РСР (на 5000 Ом); 4) монтажна панель.

Теоретичні відомості та опис приладів

У даній роботі пропонується експериментально дослідити затухаючі електромагнітні коливання за допомогою осцилографа. Принципіальну схему наведено на рис. 80. Конденсатор C_1 заряджається через опір

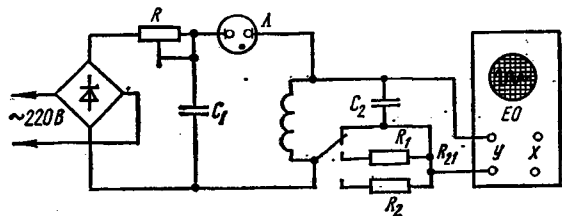


Рис. 80

R . Коли напруга досягає потенціалу запалювання тиратрона, то через нього проходить струм. Імпульс струму збуджує в контурі затухаючі

електромагнітні коливання. Імпульси струму періодично повторюються, і на екрані осцилографа спостерігається нерухома картина затухаючих коливань.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему за рис. 80.
2. Дістати на осцилографі нерухома картину затухаючих коливань.
3. Виміряти сусідні значення амплітуди і підрахувати логарифмічний декремент затухання коливального контура за формулою (3).
4. Підключити в контур по черзі активні опори R_1 , R_2 і повторити вимірювання, зазначені в пп. 2, 3.
5. Результати занести до таблиці.
6. Обчислити похибку вимірювань.

Контрольні запитання

1. Що називають потенціалом запалювання неонові лампи?
2. Виведіть диференціальне рівняння електромагнітних коливань в коливальному контурі.
3. Який принцип роботи релаксаційного генератора, що застосовується в даній роботі?

15. Дослідження електромагнітних хвиль в двопровідній лінії [10—12]

Прилади і матеріали: 1) генератор електромагнітних хвиль; 2) двопровідна лінія; 3) індикатор електромагнітних хвиль.

Теоретичні відомості та опис приладів

Двopовідна лінія (лінія Лехера) — система з двох довгих паралельних циліндричних провідників радіуса r , розміщених на відстані h ($h > r$). Лінія Лехера — система з розподіленими параметрами L_0 і C_0 (L_0 і C_0 — індуктивність і ємність, що припадає на одиницю довжини лінії). Лінія Лехера дає змогу проводити дослідження електромагнітних хвиль в строго вираженому напрямі вздовж провідників лінії.

Для напруги U між провідниками лінії справедливе хвильове рівняння

$$L_0 C_0 \frac{d^2 U}{dt^2} = \frac{d^2 U}{dz^2}, \quad (a)$$

де z — координата розглядуваного перерізу лінії. Аналогічне рівняння характерне і для сили струму:

$$L_0 C_0 \frac{d^2 I}{dt^2} = \frac{d^2 I}{dz^2}. \quad (b)$$

Розв'язки рівнянь (a) і (b) дають рівняння біжучих хвиль напруги і сили струму:

$$U = U_m \sin \omega (t - z/v), \quad \text{де } v = 1/L_0 C_0, \quad (b)$$

$$I = I_m \sin \omega (t - z/v). \quad (r)$$

Аналогічно аналізується питання про біжучі хвилі електричного E і магнітного \vec{H} полів в лінії. Величини U_m і I_m пов'язані співвідношенням

$$U_m = Z I_m, \quad (д)$$

де Z — хвильовий опір лінії ($Z = \sqrt{L_0/C_0}$).

Для обчислення швидкості поширення хвилі скористаємось значеннями для L_0 (у генрі на метр (Гн/м)) і C_0 (у фарадах на метр (Ф/м)):

$$L_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \ln[(r+h)/r] \cong \frac{\mu_0}{\pi} \ln(h/r), \quad (е)$$

$$C_0 = \pi \epsilon_0 / \ln[(h+r)/r] \cong \pi \epsilon_0 / \ln(h/r). \quad (ж)$$

На підставі (в), (г), (д) дістаємо:

$$v = 1/\sqrt{L_0 C_0} = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = c, \quad (з)$$

тобто швидкості поширення електромагнітних хвиль уздовж лінії Лехера і у вільному просторі однакові. Якщо лінія Лехера розміщена в діелектрику, то швидкість хвилі при цьому зменшується:

$$v' = c/\sqrt{\epsilon \mu},$$

де ϵ і μ — діелектрична і магнітна проникності ді-

електрика. Для більшості діелектриків $\mu \approx 1$, отже, практично:

$$v' = c/\sqrt{\epsilon}. \quad (и)$$

Якщо лінія на кінці замкнена провідним містком ($Z = 0$), то виникає відбита хвиля. В результаті інтерференції прямої біжучої і відбитої хвиль в лінії виникають стоячі хвилі. При цьому на кінці лінії виникають максимальний струм і максимальне магнітне поле, тобто пучності сили струму і напруженості магнітного поля. Електричне поле у відбитій хвилі змінює фазу на π , тобто йдеться про вузол напруги і напруженості електричного поля.

Отже, на відміну від біжучої електромагнітної хвилі, для якої вектори \vec{E} і \vec{H} змінюються синфазно, у стоячій хвилі вузли електричного поля (напруги) збігаються з пучностями магнітного поля (сили струму), і навпаки.

Очевидно, умови, які відповідають встановленню в лінії Лехера режиму стоячої хвилі, такі: на довжині лінії l , замкненої з обох кінців, повинно вкластися ціле число півхвиль:

$$l = n\lambda/2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (і)$$

Враховуючи, що $v = \lambda\nu$ (де ν — частота коливань), рівність (і) можна подати у вигляді

$$\nu_n = nv/2l.$$

Діставши стоячу електромагнітну хвилю і вимірявши відстань між сусідніми пучностями або вузлами, можна знайти $\lambda/2$ хвилі. Знаючи частоту генератора електромагнітних хвиль, можна знайти швидкість поширення хвиль $v' = \lambda\nu$. Діелектричну проникність діелектрика знайдемо на підставі (и).

В роботі використовується вертикально розміщена двопровідна лінія (рис. 81, а), що знаходиться в скляній трубці, в яку наливають різні діелектричні рідини (дистильована вода, трансформаторне масло). Діаметри провідників лінії 2—3 мм, відстань між ними 30—40 мм. Зверху і знизу трубка закривається діелектричними пробками (ебоніт, плексиглас). Через отвір у верхній пробці вздовж лінії можна переміщати за допомогою діелектричної ручки замикаючий металевий листок. Цим самим змінюється довжина провідної лінії і її настроювання в резонанс з генератором.

П р и м і т к а. Для раціонального конструктивного оформлення системи генератор — двопровідна лінія рекомендується використати конструктивно-монтажну схему демонстраційної установки типу ГШ-1.

Генератор електромагнітних коливань зібраний на основі подвійного тріода 6Н15П (рис. 81, б). Довжина стоячої хвилі в повітрі $l = \lambda_0/2$ — величина порядку 30 см. Генератор індуктивно зв'язується з лінією. За яскравістю світіння індикаторної лампочки можна зробити висновки про амплітуду коливань в даному місці лінії.

Порядок виконання роботи

1. Включити генератор коливань.
2. Після прогрівання генератора протягом 2—3 хв наблизити його до початку лінії, розміщеної в повітрі.
3. Переміщенням замикаючого містка вздовж лінії визначити по лінійці, розміщеній поряд з скляною трубкою, відстань між двома послідовними положеннями містка, при яких яскравість світіння лампочки максимальна. Ця відстань дорівнює відстані між двома сусідніми вузлами хвилі струму (магнітного поля) і відповідає $\lambda_0/2$.
4. Виконати не менш як 10 вимірювань і визначити довжину електромагнітної хвилі λ_0 в повітрі.
5. Обчислити похибки вимірювань.
6. За формулою $C = \lambda_0\nu$ визначити частоту генератора.
7. Наповнити трубку, в якій розміщена лінія Лехера, дистильованою водою. Виконати вимірювання для цього випадку згідно з пп. 3—5.
8. За формулою $\epsilon = (\lambda_0/\lambda)^2$, де λ — довжина електромагнітної хвилі у воді, розрахувати ϵ для води.
9. Аналогічні вимірювання провести для випадку, коли двопровідна лінія знаходиться в трансформаторному маслі.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється поширення електромагнітних хвиль в лінії Лехера від їх поширення у вільному просторі?
2. Який характер розподілу векторів напруженості електричного і магнітного полів у біжучій і стоячій електромагнітних хвилях?
3. Як визначаються одиничні ємність C_0 і індуктивність L_0 лінії?
4. Як пояснюється сталість поширення електромагнітних хвиль уздовж ліній з різними значеннями C_0 і L_0 ?

Розділ четвертий ОПТИКА

16. Фотометричне дослідження джерел світла [22, 25, 28, заводські інструкції до приладів]

Прилади і матеріали: 1) оптична лава; 2) фотометр; 3) еталонна лампа; 4) лампа з невідомою силою світла; 5) регулятор напруги РНШ-250; 6) селеновий фотоелемент; 7) мікроамперметр типу М24; 8) люксметр; 9) жовто-зелений світлофільтр, закріплений в тримачі фотоелемента; 10) вольтметр; 11) амперметр.

Теоретичні відомості та опис приладів

Для оптичного випромінювання, яке являє собою електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль в межах від 1 нм до 1 мм (ГОСТ 7601—78), похідні оптичні фізичні величини поділяють на дві системи величин: енергетичні (оцінюються об'єктивними енергетичними характеристиками) та світлові. На відміну від енергетичних величин, вимірювання яких не пов'язане з фізіологічною дією світла, вимірювання світлових величин ґрунтується на фізіологічній дії світла і тому значною мірою має суб'єктивний характер. Останнє зумовлене тим, що випромінюванням різних довжин хвиль відповідають, поперше, різні кольорові відчуття і, по-друге, вони зумовлюють відчуття світла різної інтенсивності.

Під *світлом* розуміють тільки видиме випромінювання в межах діапазона довжин хвиль від 380—400 до 760—780 нм (ГОСТ 7601—78).

Основною одиницею СІ стосовно оптичних величин є одиниця сили світла — кандела (кд).

Джерела світла мають широке застосування як засіб пізнання і інструмент у вимірювальній техніці, а також для суто практичних цілей.

Умовно джерела світла можна поділити на теплові (абсолютно чорне тіло, електричні лампи розжарювання, штифти і сітки розжарення і т. п.), електричні дуги і іскри, газосвітні та лазерні джерела.

Оптичні методи дослідження або технічного контролю в більшості випадків пов'язані з фотометрією. *Фотометрія* — розділ прикладної оптики, в якому вивчається методика і техніка вимірювання параметрів джерел світла, світлових пучків та освітлених поверхонь. Методи фотометрії можна умовно поділити на візуальні, електричні та фотографічні.

Назвемо основні світлові характеристики джерел світла.

Світловий потік Φ — величина, яка дорівнює добутку сили світла I джерела на тілесний кут ω :

$$\Phi = I\omega.$$

Одиницею світлового потоку в СІ є люмен (лм). 1 лм = 1 кд · ср. Зрозуміло, що повний світловий потік, який випромінюється джерелом силою світла I , дорівнює $\Phi = 4\pi I$.

Дослідним шляхом встановлено, що світловому потоку в 1 лм, створеному випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda = 555$ нм, відповідає потік випромінювання $\Phi_e = 0,0016$ Вт.

Освітленість E — величина, що дорівнює відношенню світлового потоку Φ , який падає на поверхню, до площі S цієї поверхні ($E = \Phi/S$). Одиницею освітленості в СІ є люкс (лк). 1 лк = 1 лм/м².

Згідно з основним рівнянням фотометрії — законом Ламберта (закон обернених квадратів), освітленість, створювану точковим джерелом світла, можна виразити через силу світла I :

$$E = (I/r^2) \cos \alpha, \quad (a)$$

де r — відстань від джерела до освітлюваної поверхні; α — кут між нормаллю до поверхні і напрямом до джерела. Для реальних джерел світла цей закон виконується з високим ступенем точності, якщо поперечні розміри джерела малі порівняно з відстанню (1 : 1000, але не більш як 1 : 10). Освітленість поверхні не залежить від спектрального складу світла.

Визначення сили світла джерела практично здійснюється порівнянням сили світла двох джерел (відомого і невідомого), тобто досяганням однакової освітленості пластинки двома джерелами ($E_1 = E_2$). Якщо сила світла одного джерела I_1 відома, то, вимірюючи відстані r_1 і r_2 від джерел до пластинки, можна визначити силу світла I_2 невідомого джерела за формулою

$$I_2 = I_1 (r_2^2/r_1^2). \quad (б)$$

Реальні джерела світла (наприклад, електричні лампи) є неізотропними, тобто сила світла джерела неоднакова в різних напрямках: $I = I(\varphi)$. Криві $I(\varphi)$ (індикатрис) зручно подавати в полярних координатах.

Одним з найдосконаліших *візуальних фотометрів* є фотометр Люмера — Бродхуна. Його оптичну схему наведено на рис. 82. Світлові пучки від двох джерел, відомого 1 і досліджуваного 2, падають на пластинку 3, яка дифузно розсіює світло. Частина розсіяного світла у вигляді паралельних пучків падає на дві прямокутні призми 4 і 7 повного внутрішнього відбиття. Відбиваючись від гіпотенузуних

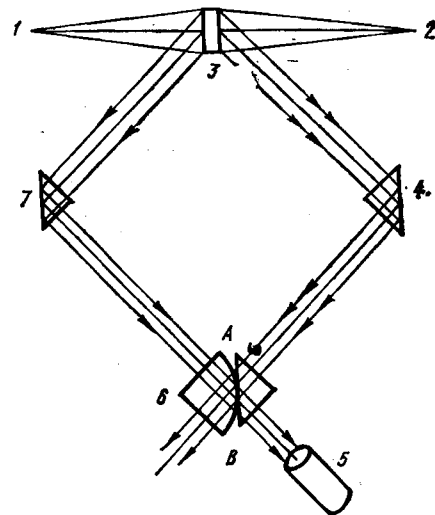


Рис. 82

граней цих призм, світло потрапляє на фотометричний кубик Люммера — Бродхуна 6. Цей кубик являє собою дві прямокутні призми. Гіпотенузна грань правої призми — плоска, гіпотенузна грань лівої призми — частина сфери. У місці дотику призм існує оптичний контакт.

У фотометрах простішої конструкції сфера лівої призми відшліфована так, що утворюється плоский круг. В окулярну зорову трубу 5 попадає світло від джерела 1, яке проходить через площину оптичного контакту, а також світло від джерела 2 після відбивання від площини оптичного контакту. Отже, фотометричне поле — це круг з концентричним кільцем, що охоплює його (рис. 83). Освітленість внутрішнього круга зумовлена джерелом 1, а освітленість зовнішнього кільця — джерелом 2. При рівності освітленостей ($E_1 = E_2$) видима межа між внутрішнім і зовнішнім полями зникає.

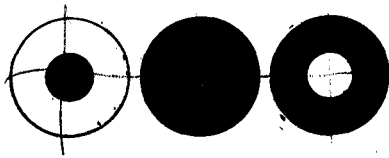


Рис. 83

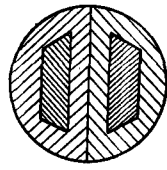


Рис. 84

У більш точних фотометрах на поверхні правої призми зроблено невеликі заглиблення у вигляді трапеції. Це забезпечує переплетені фотометричні поля (рис. 84), що в свою чергу дає підвищення точності фіксації моменту зникнення межі. У місцях заглиблень оптичного контакту немає. На рис. 84 області, заштриховані в одному напрямі, зумовлені дією одного джерела. При фотометричній «рівновазі» поле зору труби рівномірно освітлене ($E_1 = E_2$) і контурів заглиблень не видно.

Економічність електроламп характеризується питомою потужністю η — величиною, яка дорівнює відношенню електричної потужності P , що споживається лампою, до сили світла:

$$\eta = P/I. \quad (в)$$

Величина η залежить від температури і матеріалу нитки. Питома потужність η визначається безпосередньо фотометруванням при одночасному вимірюванні споживаної потужності електричного струму.

При виконанні роботи лампи розміщують на лаві в спеціальних тримачах, які дають змогу здійснювати переміщення їх вздовж лави і повороти навколо вертикальної осі. Живлення ламп здійснюється стабілізованою напругою.

Силу світла довільного точкового джерела можна виміряти за допомогою *об'єктивного фотометра* (люксметр, мікроамперметр), у коло якого ввімкнено фотоелемент. Величина фото-е. р. с. фотоелемента (а при сталому опорі кола і значення сили струму) пропорційна в певних межах потоковій випромінюванню, яке падає.

При рівності потоків випромінювання від обох джерел світла ($\Phi_{e1} = \Phi_{e2}$), а отже, і енергетичних освітленостей ($E_{e1} = E_{e2}$, $E_e = \Phi_e/S$, де S — площа фотоелемента) покази мікроамперметра у колі фотоелемента в обох випадках будуть однаковими.

Порядок виконання роботи

I. Виміряти силу світла лампи за допомогою візуального фотометра.

1. Установити еталонну і досліджувану лампи на кінцях оптичної лави (лампи — в чохлах). Між ними на однаковій відстані розміщується фотометр. Забезпечити паралельність ниток розжарення ламп.

2. Переміщуючи фотометр уздовж оптичної лави, досягти фотометричної «рівноваги» і виміряти відстані r_1 і r_2 по шкалі лави.

3. Повернути камеру фотометра на 180° навколо горизонтальної осі. Повторити операції, зазначені в п. 2, і виміряти відстані r'_1 і r'_2 .

4. Операції, зазначені в пп. 2 і 3, повторити для трьох різних відстаней між джерелами світла.

5. Для кожного вимірювання при відомому значенні I_1 розрахувати згідно з формулою (б) значення I_2 і обчислити середнє значення сили світла досліджуваної лампи.

II. Виміряти силу світла лампи об'єктивним фотометром і визначити її питому потужність.

1. На оптичній лаві розмістити еталонну лампу і в спеціальних каретках жовто-зелений світлофільтр (це забезпечує світлочутливість фотоелемента, однаково з оком) та селеновий фотоелемент, з'єднаний з мікроамперметром. Джерело світла знаходиться від фотоелемента на відстані, принаймні, в 10 разів більшій за лінійні розміри джерела світла (при цьому джерело можна вважати точковим).

2. На другому кінці лави розмістити досліджуване джерело світла. Світловий пучок від нього падає на фотоелемент, проходячи через аналогічний світлофільтр.

3. Підібрати відстані r_1 і r_2 між джерелами і фотоелементом такими, щоб забезпечити однаковість показів мікроамперметра. За відомою силою світла еталонного джерела згідно з формулою (б) розрахувати силу світла I_2 досліджуваної лампи.

Фотоелемент в тримачі повертати навколо вертикальної осі на 180° при вимірюванні освітленості від кожної лампи.

Всі вимірювання повторити для трьох різних відстаней r_1 і r_2 та обчислити середнє значення I_2 .

4. Провести аналогічні до п. 3 вимірювання, одночасно фіксуючи амперметром і вольтметром робочі силу струму I і напругу U живлення досліджуваної лампи. Знаючи P і I , розрахувати згідно з формулою (в) питому потужність лампи. Подати графічно залежність $\eta(U)$.

III. Дослідити світлове поле лампи (індикатрису розсіювання).

1. Встановити еталонну і досліджувану лампи та фотометр аналогічно п. 1 (завдання I).

2. Виміряти силу світла досліджуваної лампи I_2 , виконавши операції відповідно до пп. 1—5 (того самого завдання).

3. Повертаючи в тримачі навколо вертикальної осі лампу 3, визначити аналогічно п. 2 силу світла I_2 через кожні 15° , зробивши півоберта. Кут повороту фіксується на лімбі тримача. За здобутими результатами накреслити криву розподілу сили світла I_ϕ залежно від кута повороту лампи ϕ , відкладаючи по радіусах в наперед обраному масштабі значення I_2 , які відповідають цим кутам.

4. Ознайомитися із заводською інструкцією до люксметра. Провести аналогічні до п. 3 дослідження I_ϕ (ϕ). Порівняти залежності I_ϕ (ϕ), одержані за допомогою фотометра і люксметра.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте основні енергетичні та світлові оптичні величини та зв'язок між ними.
2. Охарактеризуйте методи вимірювання світлових величин.
3. Які будова і принцип дії фотометра Люммера — Бродхуна?
4. У чому полягає принцип дії об'єктивних фотометрів? Які його переваги над методом суб'єктивної фотометрії?

17. Визначення енергетичних оптичних величин зразків матеріалів за допомогою універсального фотометра [22, 24, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) універсальний фотометр ФМ-56; 2) набір світлофільтрів; 3) набір прозорих пластинок (скло, поліметилметакрилат, слюда); 4) штангенциркуль.

Теоретичні відомості та опис приладів

У загальному випадку при падінні випромінювання на тіло потік Φ_e частково відбивається (Φ'_e), частково поглинається тілом (Φ''_e) і частково проходить наскрізь (Φ'''_e). Очевидно,

$$\Phi_e = \Phi'_e + \Phi''_e + \Phi'''_e.$$

Поділивши обидві частини цієї рівності на Φ_e , дістаємо:

$$\rho + \alpha + \tau = 1,$$

де $\rho = \Phi'_e/\Phi_e$, $\alpha = \Phi''_e/\Phi_e$, $\tau = \Phi'''_e/\Phi_e$ — відповідно коефіцієнти відбиття, поглинання і пропускання.

Кожний з цих коефіцієнтів є функцією довжини хвилі. Через це різні речовини, на які падає видиме випромінювання (світло) однакового спектрального складу, сприймаються як різноколірні.

Інформація про коефіцієнти, які характеризують ефект взаємодії випромінювання з речовиною, має величезне практичне значення. Вимірюються ці коефіцієнти за допомогою фотометричних і спектрофотометричних приладів.

Принцип дії фотометра полягає в порівнянні двох світлових потоків. Два світлових пучки I і II (рис. 85) потрапляють у прилад через діафрагми 2, відкриття яких регулюється вимірювальними барабанами

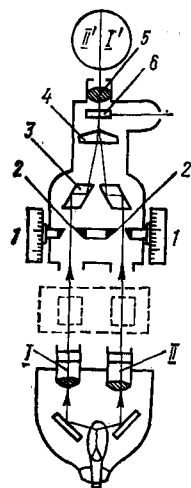


Рис. 85

1. Далі світлові пучки за допомогою системи лінз, ромбічних призм 3 об'єднуються і надходять в біпризму 4. Біпризма зводить обидва пучки до окуляра 5. Попередньо пучки проходять через світлофільтр 6 (в наборі ФМ-56 є 11 різних світлофільтрів). Конструкція окуляра така, що спостерігач бачить поле зору у вигляді круга, розділеного на дві по-

ловини; їх яскравість в загальному випадку неоднакова. Яскравість лівої частини поля визначається світловим потоком, який проходить через праву діафрагму, а правої частини — потоком, що проходить через ліву діафрагму. При однаковому розкритті та освітленні діафрагм яскравість обох половин поля зору буде однаковою.

Яскравістю B_ϕ світної поверхні в деякому напрямі ϕ називається величина, яка дорівнює відношенню сили світла I в цьому напрямі до площі S проекції світної поверхні на площину, перпендикулярну до даного напрямку, тобто

$$B_\phi = I/(S \cdot \cos \phi).$$

Поклавши $I = 1$ кд, $S = 1$ м², $\phi = 0$, маємо:

$$[B_\phi] = 1 \text{ кд}/(1 \text{ м}^2 \cdot 1) = 1 \text{ кд}/\text{м}^2.$$

Якщо на шляху одного світлового пучка, наприклад I , помістити зразок речовини, яка частково поглинає або відбиває світло, поле I стане менш яскравим. Для вимірювання яскравостей полів потрібно зменшити інтенсивність випромінювання пучка II шляхом зменшення відкриття відповідної діафрагми.

На вимірювальних барабанах нанесено дві шкали — чорну і червону. Поділки чорної шкали (в процентах) показують відношення площі отвору діафрагми S при даному її розкритті до площі S_0 при її максимальному розкритті. Оскільки потік випромінювання, яке пропускається діафрагмою, пропорційний площі розкриття діафрагми, то відношення S/S_0 дає відношення потоку, який пройшов через діафрагму при отворі S , до потоку, що проходить через діафрагму при її повному розкритті.

Отже, покази чорної шкали барабана відповідають коефіцієнтам пропускання τ для прозорих тіл, якщо відбиття можна знехтувати, або коефіцієнтам відбиття для непрозорих тіл.

Червона шкала на вимірювальних барабанах є шкалою оптичних густин.

Оптичною густиною D речовини називається логарифм величини, оберненої до коефіцієнта пропускання:

$$D = \lg(1/\tau) = \lg(\Phi_e/\Phi'''_e). \quad (1)$$

Між оптичною густиною D і товщиною l прозорої речовини на основі закону Бугера встановлюється простий зв'язок.

Згідно з законом Бугера, $\phi = \phi_0 e^{-\alpha l}$, де ϕ і ϕ_0 — поверхневі густини потоку випромінювання (інтенсивності випромінювання) до проходження через речовину і після проходження через шар речовини товщиною l ; α — лінійний коефіцієнт поглинання; $\tau = e^{-\alpha l}$ і оптична густина $D = -\lg \tau$. Але $\ln \tau = -\alpha l$ і $\lg \tau = -0,43 \alpha l$. Звідси

$$D = 0,43 \alpha l. \quad (2)$$

Універсальний фотометр (рис. 86) складається з таких основних вузлів: фотометричної головки 5; револьверного диска 6 з одинадцятьма світлофільтрами (їх номери з'являються у вікні диска при його повертанні); штатива 9; предметного столика 11, який переміщається за допомогою кремальєри 12; плоского дзеркала 2 і освітлювача 4 з двома конденсаторами 3. На фотометричній головці закріплено окуляр 7 з кільцем 8, яке дає змогу встановлювати на різкість лінію поділу поля зору. Вимірювальні барабани 10 закріплені з боків фотометричної головки.

Фотометр розміщено на масивній круглій основі 1. Для вимірювань з кольоровими зразками фотометр має набір з 11 абсорбційних світлофільтрів. Вісім з них поділяють видиму область спектра на ділянки завширшки в середньому 40 нм. Для останніх полоси пропускання більш широкі; вони поділяють видиму область на три підобласті: червону, зелену і синю. Світлофільтри характеризуються ефективною довжиною хвилі λ_{ef} , яка відповідає максимуму коефіцієнта пропускання. Значення λ_{ef} наведено в таблиці.

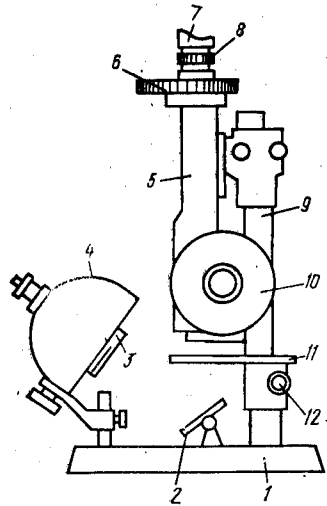


Рис. 86

№ фільт- ра	Маркування	Ефективна довжина хвилі, нм	Ширина по- лоси пропу- скання, нм
1	M-72	726	65
2	M-66	665	65
3	M-61	619	40
4	M-57	574	35
5	M-53	533	35
6	M-50	496	40
7	M-47	455	45
8	M-43	432	55
9	M-2	633	85
10	K-4	550	50
11	K-6	471	110

Пристрій для вимірювання блиску встановлюється на основі приладу замість плоского дзеркала і складається з столика, який обертається навколо горизонтальної осі, а також тримачів досліджуваних зразків і баритових пластинок.

Коефіцієнтом яскравості поверхні β називається величина, яка дорівнює відношенню яскравості поверхні B_p , що розсіює світло, до яскравості досконалого (ідеального) розсіювача B_1 , які знаходяться в однакових умовах освітленості. Ідеальним розсіювачем вважають поверхню, яка відбиває весь потік, що падає на неї, відповідно до закону Ламберта. Для нього яскравість не залежить від напрямку. Закон Ламберта строго справедливий тільки для абсолютно чорного тіла. Матові поверхні (наприклад, біла поверхня тіла, вкрита оксидом магнію, або молочне скло) також досить строго підлягають закону Ламберта.

Коефіцієнт яскравості залежить від кута падіння світлових пучків і від напрямку спостереження.

Вимірювання коефіцієнта β світлорозсіюючих зразків виконується за допомогою пристрою для вимірювання блиску, який встановлюється в фотометрі замість дзеркала 2 (рис. 86) так, щоб відліковий лімб був справа від оператора. Поворотний столик розміщують в горизонтальному положенні. Отже, коефіцієнт яскравості вимірюється в напрямі нормалі до зразка.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати фотометр до роботи. Для цього:

а) включити освітлювач на номінальну напругу живлення; б) встановити його так, щоб світлові пучки, які відбиваються від дзеркала, давали однакове освітлення отворів фотометра (при цьому обидва барабани розміщені на поділці «100», що відповідає однаковому розкриттю діафрагми); в) ввести зелений світлофільтр № 4, сфокусувати окуляр за допомогою кільця 8 на лінію поділу полів порівняння і спостерігати зображення спіралі лампи освітлювача в обох половинах поля зору (якщо зображення не різкі, то різкості добиваються повертанням освітлювача, пересуванням його конденсора, обертанням плоского дзеркала); г) для створення рівномірної освітленості фону спостережень в пази оправ конденсорів встановити матові розсіювачі; після цього вимкнути світлофільтри.

1. Виміряти коефіцієнт пропускання прозорого зразка.

1. Виміряти штангенциркулем товщину досліджуваних зразків з прозорого матеріалу.

2. Правий барабан по чорній шкалі встановити на поділці «100» (при цьому діафрагма, зв'язана з правим барабаном, повністю відкрита). Досліджуваний зразок покласти на предметний столик під лівою діафрагмою, при цьому права половина зору потемніє. Обертаючи правий барабан, добитися однакової яскравості обох половин поля зору і зробити відлік по чорній шкалі барабана, який відповідає коефіцієнту пропускання τ . Для підвищення точності вимірювання зразок пере-класти з-під одного отвору під інший, повторивши цю операцію 5—6 разів.

3. За формулами (1) і (2) розрахувати оптичну густину і лінійний коефіцієнт поглинання α . Вимірювання, аналогічні виконаним у пп. 1, 2, виконати для всіх прозорих зразків речовин.

4. Аналогічні вимірювання провести для кольорових прозорих зразків при різних довжинах хвиль. Кожний досліджуваний зразок розглянути послідовно через всі світлофільтри і для кожного світлофільтра відповідно до п. 2, 3 обчислити D і α .

5. Графічно подати залежність $\tau = f(\lambda)$.

II. Виміряти коефіцієнт яскравості і коефіцієнт відбиття світлорозсіюючих зразків.

1. На обох тримачах пристрою розмістити баритові пластинки (барит — важкий шпат BaSO_4) і освітити їх рівномірно освітлювачем (при цьому розсіювачі з пазів конденсора виймають).

2. Лівий барабан виставити на поділці «100» по чорній шкалі, а правий — в середнє положення фотометричної рівноваги.

3. Баритову пластинку під правим пучком замінити досліджуваним зразком. Порушену фотометричну рівновагу відновити поворотом лівого барабана. Середній відлік по чорній шкалі цього барабана відповідає процентному відношенню коефіцієнта яскравості зразка β_z до коефіцієнта яскравості пластинки $\beta_{\text{пл}}$:

$$m = \beta_z / \beta_{\text{пл}}.$$

Вимірювання провести не менше 5—6 разів.

4. Якщо досліджуваний зразок і баритова пластинка мають подібні криві розподілу (індикатриси) відбитого світла в просторі, то на основі вимірювань коефіцієнта яскравості розрахувати коефіцієнт відбиття зразка β_3 :

$$\rho_3 = m\rho_{\text{пл.}}$$

Значення $\rho_{\text{пл}}$ відомо наперед.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні величини, які характеризують оптичне випромінювання, і світлові величини та їх одиниці.
2. Які будова та принцип дії універсального фотометра ФМ-56?
3. Сформулюйте закон Ламберта.
4. Назвіть основні типи світлофільтрів.

18. Вивчення інтерференції світла [22—24, заводські інструкції]

Хвильова природа світла досить яскраво проявляється в явищах інтерференції, дифракції та поляризації світла. *Інтерференцією* світла називають явище, яке виникає при додаванні світлових хвиль і полягає в тому, що інтенсивність результуючої світлової хвилі, залежно від різниці фаз хвиль, які додаються, може бути більше або менше за суму їхніх інтенсивностей.

Інтерференція світла спостерігається тільки для когерентних світлових хвиль — таких, що мають сталу різницю фаз світлових коливань протягом певного проміжку часу, достатнього для спостереження інтерференційної картини.

Незалежні когерентні нелазерні джерела світла реалізувати практично неможливо. Проте в оптиці відомі методи утворення когерентних пучків від звичайних джерел світла. Перший з них полягає ось у чому. Когерентні хвилі випромінюються одним елементарним випромінювачем в різних напрямках, після необхідних відбивань і заломлень їм надаються такі напрями поширення, при яких вони можуть перетинатися й інтерферувати (йдеться про інтерференцію Френеля; ця група методів дістала назву методів *поділу хвильового фронту*; вона реалізується за допомогою бідзеркала і біпризми Френеля, дзеркала Ллойда, щілин Юнга і т. п.). Другий метод утворення когерентних пучків полягає в розщепленні однієї хвилі на кілька при відбиванні і заломлюванні на поверхнях (цей метод називають методом *поділу амплітуди*; йдеться про інтерференцію Ньютона; вона реалізується в різних типах інтерферометрів; прикладом інтерференційних картин, утворених в результаті поділу амплітуди, є смуги однакової товщини і однакового нахилу, кільця Ньютона).

Інтерференційна картина являє собою послідовність світлих і темних інтерференційних смуг — максимумів і мінімумів.

Умови екстремумів мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta &= \pm m\lambda \text{ (умова максимуму),} \\ \Delta &= \pm (2m + 1)\lambda/2 \text{ (умова мінімуму),} \end{aligned} \quad (a)$$

де Δ — різниця ходу інтерферуючих пучків; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ — порядок інтерференційного максимуму і мінімуму; λ — довжина світлової хвилі.

І. Визначення довжини хвилі монохроматичного світла за допомогою інтерференції від двох щілин

Прилади і матеріали: 1) джерело світла; 2) діафрагма; 3) подвійна щілина; 4) набір світлофільтрів; 5) збиральна лінза з фокусною відстанню 0,1 — 0,15 м; 6) напівпрозорий екран; 7) вимірювальний мікроскоп; 8) масштабна лінійка; 9) оптична лава з повзунками.

Теоретичні відомості та опис приладів

Першим дослідом, яким було доведено можливість дістати інтерференцію світлових хвиль, був дослід Юнга. Користуючись схемою цього досліду, можна визначити довжину світлової хвилі. Розглянемо хід променів в дослідній установці (рис. 87). Світло від джерела S

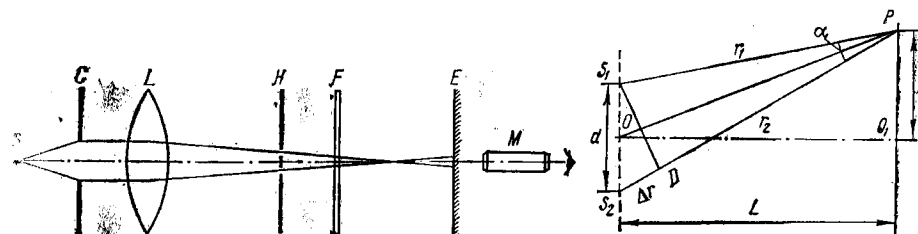


Рис. 87

Рис. 88

через вузьку діафрагму C спрямовується на подвійну щілину H . За допомогою лінзи L діафрагма фокусується на площині подвійної щілини. Світлові промені від щілин пропускають через світлофільтри F , фокусуючи мікроскоп M на напівпрозорий екран E , спостерігають інтерференційну картину. З рис. 88 маємо:

$$\Delta r/d = x_m/L, \quad (1)$$

де x_m — відстань максимуму та мінімуму порядку m від O_1 ; L — відстань від подвійної щілини до екрана; d — відстань між центрами щілин (замість $S_1 D$ беремо d , оскільки кут α досить малий). Знайдемо для двох довільних темних смуг на екрані їх відстань від точки O_1 . Для цього запишемо умови мінімуму інтерференції (а):

$$\Delta r_m = (2m + 1)\lambda/2.$$

Тоді шукані відстані згідно з (1) відповідно дорівнюють:

$$x_m = (L/d)(2m + 1)\lambda/2.$$

Відстань між обраними темними смугами

$$\Delta x = x_{m+n} - x_n = n\lambda L/d,$$

звідки довжина хвилі

$$\lambda = \Delta x \cdot d/nL \quad (2)$$

(n — кількість світлих смуг між досліджуваними темними смугами; Δx — відстань, виміряна мікроскопом).

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою вимірювального мікроскопа. Від'юстувати дослідну установку. Встановити один із світлофільтрів. За допомогою вимірювального мікроскопа домогтися спостереження контрастної інтерференційної картини.

2. За допомогою бокового гвинта мікроскопа перемістити інтерференційну картину в центр поля зору. З'ясувати, як впливають на інтерференційну картину геометричні параметри схеми.

3. Підрахувати кількість світлих смуг між будь-якими поділками шкали окуляра мікроскопа i , враховуючи ціну поділки, визначити відстань Δx між кінцевими темними смугами.

4. Виконати подібні вимірювання для 3—4 світлофільтрів, залишаючи незмінними всі геометричні параметри досліду. Результати вимірювань занести до таблиці.

5. Підрахувати за робочою формулою (2) довжини хвиль та обчислити похибки вимірювань. Значення параметра d дає лаборант.

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище інтерференції?
2. Охарактеризуйте методи утворення когерентних пучків.
3. Що таке оптична різниця ходу?
4. Як зміниться інтерференційна картина, якщо не користуватися світлофільтрами?
5. Чим визначається кількість видимих інтерференційних смуг?

II. Дослідження інтерференції світла за допомогою біпризми Френеля

Прилади і матеріали: 1) освітлювач; 2) діафрагма; 3) біпризма; 4) набір світлофільтрів; 5) вимірювальний мікроскоп; 6) оптична лава з повзунками; 7) збиральна лінза з фокусною відстанню 10—20 см.

Теоретичні відомості та опис приладів

Біпризма Френеля складається з двох призм з малими заломлюючими кутами (порядку 30°), склеєних основами.

Світловий пучок від джерела (щілинна діафрагма S) (рис. 89) після заломлення у біпризмі A поділяється на два когерентних пучки з вершинами в уявних зображеннях S' і S'' щілини S . Оскільки джерела

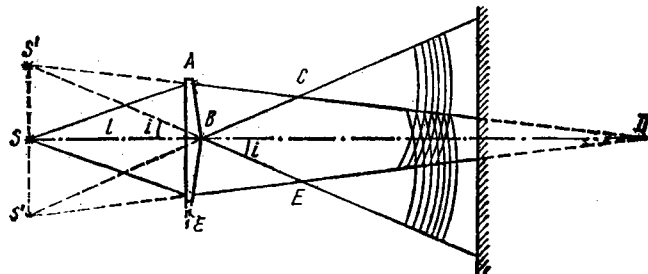


Рис. 89

S' та S'' когерентні, у будь-якій точці області перекриття пучків $BCDE$ спостерігатиметься інтерференційна картина. При спостереженнях фіксується певна площа (або поверхня) в просторі — поле інтерференції. Вибір поля певною мірою довільний і залежить від різних обставин, але через кожну точку поля має проходити не менш як два інтерферуючих пучки. Можна вважати, що при спостереженні у мікроскопі інтерференційна картина локалізована в площині шкали окуляра. Інтерференційна картина, створена біпризмою Френеля, аналогічна картині інтерференції від двох щілин. Тому для визначення довжини хвилі джерела або світлофільтра можна скористатися формулою (1) завдання I. Параметр Δx вимірюється за допомогою мікроскопа, L — масштабною лінійкою. Відстань між уявними джерелами знаходимо, вдаючись до таких міркувань. З $\triangle SS'B$ (рис. 89), враховуючи малість кута відхилення променів призмою, можна дістати $SS' = d/2 = SB \cdot i = li$. Для призми із заломлюючим кутом ε та показником заломлення n кут відхилення i дорівнює $i = (n - 1)\varepsilon$. Тоді шукана відстань між уявними джерелами

$$d = 2l(n - 1)\varepsilon, \quad (1)$$

а довжина хвилі

$$\lambda = \Delta x \cdot 2l(n - 1)\varepsilon/L. \quad (2)$$

Як відомо, при використанні білого світла спостерігаються інтерференційні спектри. Але при великих порядках інтерференції може бути перекриття спектрів, що приводить до розмивання інтерференційної картини. Очевидно, умовою зникнення інтерференційної картини є

$$m(\lambda + \Delta\lambda) = (m + 1)\lambda,$$

звідки $m = \lambda/\Delta\lambda$. Тобто, чим більша монохроматичність світла, тим більшу кількість максимумів можна спостерігати. Крім того, остання залежність дає змогу визначити смугу пропускання фільтра за допомогою вимірювання кількості видимих інтерференційних смуг. Загальна кількість видимих смуг $m = 2k$, тому

$$\Delta\lambda = 2\lambda/m. \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

I. Здійснити якісні спостереження інтерференції світла.

1. Дістати чітку інтерференційну картину. Для цього:

а) освітити щілину, спроектувавши на неї нитку розжарення освітлювальної лампи. Подивитися через біпризму і впевнитися, що вона дає два уявних зображення щілини. Змінюючи нахил щілини, встановити її паралельно тупому куту біпризми. Ребро тупого кута біпризми має бути звернуто до щілини;

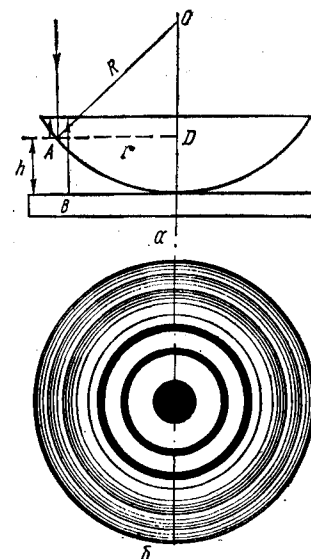


Рис. 90

б) перевірити центровку оптичної системи. Попередньо розкривши щілину, подивитися у мікроскоп і пересвідчитися, що світло не зникає в поля зору при переміщенні мікроскопа вздовж оптичної лави;

в) звузити щілину. Обертанням бокового гвинта вимірювального мікроскопа перемістити інтерференційну картину в центр поля зору. Пересуваючи мікроскоп вздовж оптичної лави та злегка регулюючи нахил щілини, домогтися максимальної контрастності інтерференційної картини.

2. Пересвідчитися, що інтерференційну картину можна спостерігати в довільній точці області, де взаємодіють когерентні пучки (область $ABCD$), тобто смуги видно при довільному положенні мікроскопа на оптичній лаві.

3. З'ясувати, як впливає на інтерференційну картину: а) ширина щілини; б) відстань між уявними джерелами (змінювати відстань між щілиною та біпризмою); в) відстань між джерелом та точкою спостереження.

II. Визначити довжини хвилі та смуги пропускання світлофільтра.

1. Змінюючи ширину щілинної діафрагми і взаємне розташування біпризми та мікроскопа, домогтися того, щоб інтерференційні смуги були контрастними при достатній для вимірювання відстані між ними.

2. За допомогою вимірювального мікроскопа визначити ширину смуги Δx . Для цього сумістити нитку окулярного мікрометра з початком однієї з темних смуг. Зробити відлік по шкалі барабана мікроскопа. Перемістити нитку окулярного мікрометра на якомога більшу кількість смуг n та зробити другий відлік. Поділити різницю цих відліків на кількість смуг. Вимірювання зробити кілька разів і взяти середнє значення.

3. Виміряти відстань від когерентних джерел до поля інтерференції. У нашому випадку L — відстань між щілиною та окуляром мікроскопа, оскільки можна вважати, що уявні джерела знаходяться в площині щілини.

4. Якщо параметри біпризми відомі, виміряти відстань l між щілиною та біпризмою і підрахувати відстань між уявними джерелами за формулою (1), а довжину хвилі за формулою (2).

5. Якщо параметри біпризми невідомі, відстань між уявними джерелами визначається експериментально. Для цього, не зрушуючи приладів на оптичній лаві, помістити між біпризмою та відліковим мікроскопом збиральну лінзу. Зміщуючи лінзу вздовж оптичної лави, дістати в полі зору мікроскопа чіткі зображення щілини. Виміряти відстань між ними d' . Виміряти відстані між щілиною та лінзою d і між лінзою та окуляром мікроскопа b . Розрахувати дійсну відстань між уявними джерелами, користуючись формулою збільшення лінзи $d = d'a/b$.

6. Визначивши довжину хвилі, підрахувати кількість видимих смуг, за формулою (3) обчислити ширину смуги пропускання світлофільтра.

Контрольні запитання

1. Чому джерела S' та S'' когерентні?
2. Чому заломлюючий кут біпризми повинен бути малим?
3. Чим визначається кількість видимих інтерференційних смуг?
4. Як зміниться інтерференційна картина, якщо змінити світлофільтр (змінити λ , змінити $\Delta\lambda$)?
5. Що найбільше впливає на точність вимірювання в даній роботі?

III. Дослідження інтерференції світла за допомогою кілець Ньютона

Прилади і матеріали: 1) освітлювач; 2) мікроскоп; 3) напівпрозора пластинка; 4) опукла лінза; 5) плоскопаралельна скляна пластинка; 6) набір світлофільтрів.

Теоретичні відомості та опис приладів

Кільця Ньютона являють собою приклад інтерференційної картини у тонких прозорих плівках як інтерференційні *смуги однакової товщини*. Якщо на прозору плівку (пластинку) падає паралельний пучок світла, то на верхній і нижній поверхнях її він роздвоюється (частково відбивається, частково заломлюється). Таким чином, у відбитому та прохідному світлі виникають когерентні промені. Різниця ходу в загальному випадку визначається товщиною плівки, кутом падіння променів та оптичною густиною плівки і оточуючого середовища (показниками заломлення). Звичайно, тоненька плівка являє собою тонкий шар якої-небудь речовини (скло, рідина), оточений з двох боків повітрям. Умови відбивання світла на верхній і нижній поверхнях плівки різні. На одній поверхні відбивання відбувається з втратою півхвилі (нижня — середовище — повітря), на іншій (верхня — повітря — середовище) — без втрати. Вираз для оптичної різниці ходу має такий вигляд:

$$\Delta = 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \lambda/2. \quad (1)$$

Кільця Ньютона спостерігаються тоді, коли сферична поверхня опуклої лінзи великого радіуса кривизни стикається з плоскою поверхнею. При цьому між лінзою та пластинкою утворюється повітряний зазор — плівка змінної товщини (рис. 90, а). Проведемо розрахунки кілець Ньютона, що спостерігаються у відбитому світлі (інтерференційні картини у відбитому світлі спостерігати зручніше). У цьому випадку інтерферуватимуть промені, відбиті від верхньої та нижньої меж повітряного зазора. Отже, лінії максимумів та мінімумів проходять через точки, що відповідають однаковій товщині зазора, і тому називаються *смугами однакової товщини* (рис. 90, б). Якщо промені падають нормально до поверхні пластинки (рис. 91), то внаслідок малості кривизни лінзи можна вважати, що відбиваються вони теж по

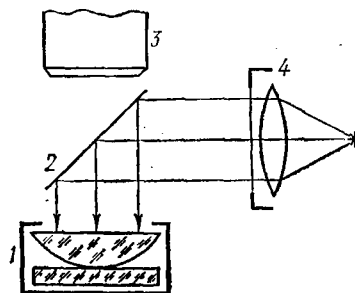


Рис. 91

нормалі. Отже, для різниці ходу променів (1) дістанемо:

$$\Delta = 2h + \lambda/2 \quad (1a)$$

(для повітря $n = 1$, кут падіння $i = 0$). Товщина повітряного зазора h залежить від відстані до точки дотику лінзи з пластинкою r . З ΔAOD маємо: $r^2 = R^2 - (R - h)^2$. Оскільки лінза має великий радіус кривизни ($R \gg h$), можна записати: $r^2 = 2Rh$, звідки $h = r^2/2R$.

Для точок, в яких виконується умова $\Delta = r^2/R + \lambda/2 = m\lambda$, спостерігається максимум інтерференції. Отже, радіус світлого кільця $r_{св} = \sqrt{\lambda R(m - 1/2)}$. Аналогічно радіус темного кільця $r_t = \sqrt{\lambda Rm}$. Звідси

$$R = r^2/(\lambda m). \quad (2)$$

Оскільки практично не вдається досягти щільного прилягання пластинки до лінзи, то більш точний результат буде при визначенні R (або λ) за різницею радіусів двох довільних кілець r_i і r_k . Тоді формула (2) набере вигляду

$$R = r_i^2 - r_k^2/(\lambda(i - k)). \quad (3)$$

Відрахунок темних кілець починається з $m = 0$, тобто від самого центра інтерференційної картини. Відрахунок світлих кілець починається з $m = 1$.

Порядок виконання роботи

1. Закріпити в обоймі лінзу та плоскопаралельну пластинку і помістити обойму на середину предметного столика мікроскопа. Переміщенням тубуса мікроскопа дістати різке зображення кілець Ньютона.

2. Злегка зміщуючи обойму, навести поле зору мікроскопа на центральний темний круг. Обертаючи барабани мікрометричних гвинтів взаємно перпендикулярних переміщень предметного столика мікроскопа, навести перехрестя ниток в окулярі на центр темного круга. Записати покази шкал барабанів.

3. Виміряти радіуси 5—6 темних кілець, починаючи з 3-го в одному напрямі (напрямі x). Оскільки кільця мають скінченну ширину, то треба обрати однаково розміщену точку для наведення перехрестя ниток в окулярі (найкраще — закінчення темної смуги). Радіус кільця дорівнюватиме різниці показів шкали барабана. Аналогічні вимірювання виконати для другого напрямку (напряму y) для тих самих кілець. Обчислити середнє значення радіуса кожного кільця.

4. Обчислити радіус кривизни лінзи згідно з формулами (2) і (3). Замінити світлофільтр. Виміряти радіуси 5—7 кілець та побудувати графік $r^2 = f(m)$. За нахилом цього графіка обчислити значення довжини хвилі λ .

5. Підрахувати кількість видимих інтерференційних кілець та обчислити за формулою (3) завдання II ширину смуги пропускання світлофільтра.

Контрольні запитання

1. Чому інтерференція спостерігається лише у тонких плівках?
2. Чим відрізняються кільця Ньютона у відбитому та прохідному світлі?
3. Чим може бути спричинене викривлення кілець?
4. Як зміниться вигляд кілець, якщо простір між лінзою та пластинкою заповнити водою?
5. Який вигляд матиме інтерференційна картина, якщо сферичну лінзу замінити циліндричною?
6. Якими будуть кільця Ньютона при освітленні білим світлом?

IV. Вивчення дефектів відбивних поверхонь за допомогою інтерферометра Лінника

Прилади і матеріали: 1) мікроінтерферометр МИИ-4; 2) металеві пластинки різної чистоти обробки та з тонкими прозорими плівками; 3) набір світлофільтрів.

Теоретичні відомості та опис приладів

Інтерференційні явища дають змогу виконувати прецизійні вимірювання лінійних та кутових розмірів, коефіцієнтів заломлення і т. п., тобто будь-яких величин, від яких залежить різниця фаз інтерферуючих пучків. Прилади для таких вимірювань називаються *інтерферометрами*. Класичним прикладом двопроменевого інтерферометра є

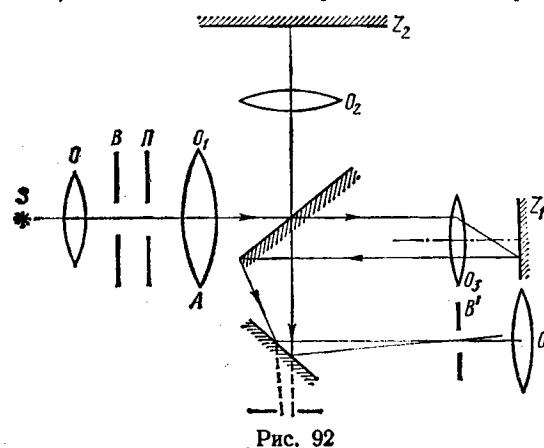


Рис. 92

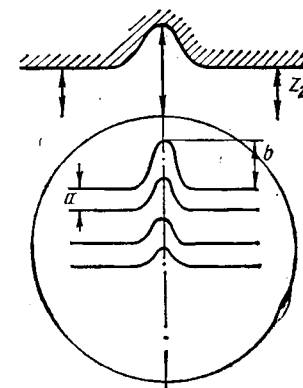


Рис. 93

інтерферометр Майкельсона — прототип багатьох сучасних приладів, оскільки в ньому можна реалізувати різні випадки інтерференції в пластинках — товстих і тонких, клиноподібних і плоскопаралельних. При цьому змінюються умови освітлення та засоби спостереження інтерференції.

В. П. Лінник на основі інтерферометра Майкельсона побудував мікроінтерферометр для досліджень дефектів відбивних поверхонь. Оптичну схему мікроінтерферометра наведено на рис. 92. Джерело світла (лампочка розжарювання) зображується в площині апертурної діафрагми A. Далі, у фокальній площині проєкційного об'єктива O_1 є польова діафрагма P, яка зображується ним на нескінченності. Після

проекційного об'єктива O_1 пучок світла поділяється світлоподільною пластинкою на два пучки. Один з них збирається у фокальній площині об'єктива O_2 , де міститься досліджувана поверхня Z_2 . Другий пучок децентрованим об'єктивом O_3 збирається на еталонному дзеркалі Z_1 . Після відбиття від Z_1 і Z_2 ці пучки знов проходять об'єктиви O_2 і O_3 , а потім, після світлоподільної пластинки, збираються в точках поля інтерференції, яке розглядається через окуляр Ok .

У мікроінтерферометрі розміри інтерференційних смуг змінюються внаслідок зміщення об'єктива O_3 з оптичної осі. Якщо зміщений відносно осі об'єктив O_3 обертати навколо цієї осі, то інтерференційні смуги в

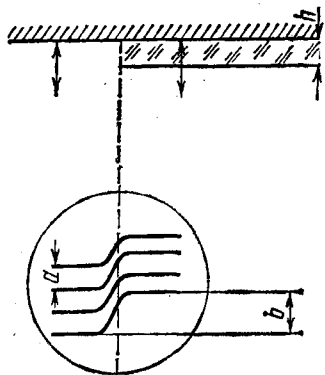


Рис. 94

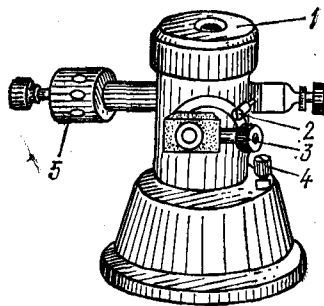


Рис. 95

полі зору обертатимуться. Переміщення досліджуваної поверхні Z_2 вгору або вниз на певну малу відстань спричинює зміну ходу променя на подвійне значення переміщення, оскільки світло проходить цю відстань двічі. Зміна ходу променя в одному плечі приладу спричинює зміну різниці ходу між інтерферуючими променями. Через це смуги в полі зору зміщуватимуться. Очевидно, форма смуг повторюватиме профіль досліджуваної поверхні, а по величині викривлення смуг можна судити про глибину нерівностей. Справді, якщо на поверхні є подряпина (рис. 93) глибиною $\lambda/2$, то в цьому місці з'являється додаткова різниця ходу (промені проходять глибину двічі). Відбувається зміщення (викривлення) смуг на одну. Якщо ж спостерігається зміщення смуг не на одну, а на N смуг, то, очевидно, глибина подряпини

$$d = (\lambda/2) N. \quad (1)$$

Оскільки можливий відлік частки смуги, мікроінтерферометри дають змогу оцінити чистоту обробки поверхні з точністю $0,1 \lambda$, тобто близько $0,05$ мкм.

Якщо на досліджувану поверхню нанесено тонкий шар будь-якої прозорої речовини, то між променями, відбитими від ділянки чистої поверхні та ділянки поверхні з покриттям, виникає оптична різниця ходу (рис. 94):

$$\Delta = 2hn - 2h = 2h(n - 1),$$

де n — показник заломлення речовини покриття. Ця різниця ходу приводить до викривлення інтерференційних смуг. Тоді

$$\lambda N = 2h(n - 1). \quad (2)$$

Якщо показник заломлення покриття відомий, можна визначити його товщину. Зовнішній вигляд приладу показано на рис. 95. Досліджувані об'єкти кладуть на предметний столик 1. Освітлювач 5 створює паралельний пучок світла. Інтерференційну картину можна спостерігати в окуляр, споряджений мікрометром 3. За допомогою мікрометричного гвинта 4 здійснюють фокусування. Рукоятка 2 може вимикати (перекривати) одне плече інтерферометра (положення \uparrow).

Порядок виконання роботи

1. За заводською інструкцією докладно ознайомитися з будовою та принципом дії інтерферометра МІИ-4.

2. Розмістити по черзі на предметному столику кілька досліджуваних пластинок, одержати та візуально проаналізувати інтерференційні картини.

3. Обрати одну з пластинок, дістати різке зображення картини. Обертанням предметного столика домогтися, щоб інтерференційні смуги були перпендикулярними до подряпини. Окулярний мікрометр повернути так, щоб одна з ниток перехрещення була паралельна, а друга перпендикулярна до інтерференційних смуг.

4. Виявити найбільше викривлення смуг. Сумістити перехрестя ниток з однією смугою та зробити відлік по шкалі мікрометра 3. Потім сумістити перехрестя ниток з вершиною викривлення тієї ж смуги (рис. 93) та зробити другий відлік. Різниця цих відліків дасть величину b .

5. Виразити цю величину в долях ширини смуги. Для цього сумістити перехрестя ниток з однією із смуг та зробити відлік. Перемістити перехрестя на $5-10$ смуг та зробити другий відлік. Різниця цих відліків, поділена на кількість смуг, дасть величину a . Тоді

$$N = b/a. \quad (3)$$

Всі вимірювання зробити не менше 3 раз і взяти середнє. За формулою (1) підрахувати значення глибини подряпини. При освітленні об'єкта білим світлом довжину хвилі брати такою, що дорівнює $5,5 \cdot 10^{-7}$ м.

6. Освітити об'єкт монохроматичним світлом, підрахувати кількість видимих інтерференційних смуг та за формулою (3) завдання II обчислити ширину смуги пропускання світлофільтра.

7. Розмістити на предметному столику пластинку з нанесеним на її поверхню тонким шаром прозорої речовини. Освітити пластинку монохроматичним світлом. Вимірявши a і b (див. рис. 94, пп. 3, 4), за формулами (2) і (3) обчислити товщину покриття. (Можна виконати і обернену задачу — обчислити довжину хвилі, знаючи товщину покриття.)

Контрольні запитання

1. Який принцип роботи інтерферометра Майкельсона?
2. Які конструктивні зміни в інтерферометрі потрібно зробити для вимірювання малих кутових переміщень?
3. Чим відрізняються викривлення смуг, що відповідають подряпинам та виступам?

19. Вивчення дифракції світла [22, 23, заводські інструкції]

Дифракцією світла називають зумовлене хвильовою природою світла явище відхилення від законів поширення світла геометричної оптики, яке виникає при проходженні світла в середовищі з різними оптичними неоднорідностями. Звичайно, ці явища не зводяться до простого відбивання і заломлення світла.

Усі дифракційні явища поділяються на два типи — дифракцію Френеля і дифракцію Фраунгофера.

Розглянемо дифракцію світла від джерела S на отворі діафрагми D радіуса R (рис. 96). Якщо точку спостереження O вибрано порівняно близько до отвору, а точніше, якщо

$$R/b \gg \lambda/R, \quad (a)$$

то йдеться про дифракцію Френеля (дифракцію, що спостерігається при утворенні зображення перепони). Якщо дифракційна картина спостерігається в достатньо далекій точці, тобто, якщо

$$R/b \ll \lambda/R, \quad (б)$$

то йдеться про дифракцію Фраунгофера (дифракційне зображення джерела світла). Остання відбувається в паралельних променях (джерело світла і точка спостереження нескінченно віддалені від перепони, на якій відбувається дифракція). Математично дифракційні задачі розв'язуються на основі *принципу Гюйгенса — Френеля*, який можна сформулювати таким чином: кожна точка фронту хвилі є джерелом елементарних вторинних хвиль, що поширюються в усіх напрямках, а поверхня, яка охоплює їх через час Δt , є новим положенням фронту; вторинні хвилі є когерентними і світлове поле в точці спостереження — це результат інтерференції від окремих ділянок фронту вторинних хвиль.

1. Дослідження дифракційної картини від щілини

Прилади і матеріали: 1) оптична лава; 2) освітлювач ОИ-9; 3) коліматор з щілиною; 4) щілина з мікрометричним гвинтом; 5) екран; 6) касета для фотопластинки або фотопаяперу; 7) штангенциркуль; 8) набір світлофільтрів.

Теоретичні відомості та опис приладів

Вивчення явища дифракції світла в загальному полягає у знаходженні розподілу інтенсивності світла на екрані в залежності від геометричних умов (відстаней між джерелом світла, перепорою і екраном). Розподіл інтенсивності світла по екрану залежить також від форми та розмірів отвору. Значний інтерес становить випадок дифракції від щілини. Щілиною називатимемо прямокутний отвір, що має незначну ширину і нескінченну довжину. Практично такою буде

щілина, у якої довжина в багато разів більша за її ширину; у переважної більшості щілин це відношення дорівнює $1 : 1000$.

Якщо на вузьку щілину шириною b падає нормально до поверхні щілини плоска світлова хвиля, відбувається дифракція в обидві сторони (ліворуч та праворуч) від щілини — дифракція Фраунгофера. Як наслідок — зображення щілини на екрані розтягується у смугу з максимумами та мінімумами інтенсивності в перпендикулярному до щілини напрямі.

Наявність максимумів і мінімумів у розподілі інтенсивності світла пояснюється інтерференцією вторинних хвиль, що поширюються у різних напрямках від різних точок щілини (рис. 97). Якщо φ — кут між напрямом падіння променів на щілину і певним розглядуваним напрямом, то умова максимуму освітленості має такий вигляд:

$$b \sin \varphi = (2m + 1) \lambda / 2, \quad (1)$$

а умова мінімуму:

$$b \sin \varphi = 2m \lambda / 2, \quad (2)$$

де $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

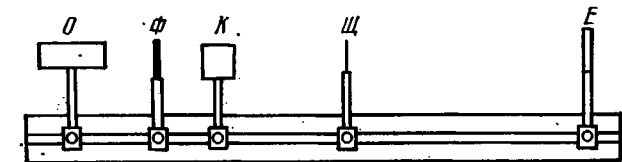


Рис. 98

Розподіл інтенсивності в дифракційній картині на екрані спостереження залежно від кута дифракції φ має вигляд

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\sin^2 [(\pi b / \lambda) \sin \varphi]}{[(\pi b / \lambda) \sin \varphi]^2},$$

де I_0 — інтенсивність світла в напрямі падаючої хвилі ($\varphi = 0$). Це рівняння свідчить про те, що при освітленні щілини пучком білого світла максимумами та мінімумами відповідних довжин хвиль зміщені один відносно одного. Нульові максимума для всіх довжин хвиль збігаються, тому в центрі дифракційної картини спостерігається біла смуга, що поступово переходить в кольорову. Далі повинні йти забарвлені в різні кольори максимума. Але при дифракції від однієї щілини практично не можна побачити чітке розділення для окремих довжин хвиль. На якість дифракційної картини досить помітно впливає ширина щілини. При збільшенні її спостерігається наближення максимумів та

мінімумів освітлення до центра. Ширина щілини b не може дорівнювати довжині хвилі λ , бо в цьому випадку $\sin \varphi = \lambda$, тобто $\varphi = \pi/2$. Це означає, що нульовий максимум розпливається по всьому екрану, — екран рівномірно освітлений. Якщо $b \gg \lambda$, то на екрані спостерігається різке зображення щілини, дифракційна картина зникає.

У випадку, коли ширина щілини b значно менша за відстань l від щілини до екрана, дифракція Фраунгофера спостерігається і без лінзи L . При цьому промені, що йдуть від країв щілини, практично паралельні. Користуючись рис. 97 для випадку дифракції від щілини, дістанемо вираз відстані останнього дифракційного максимуму від центрального:

$$x_{\max} = l \sin \varphi + b/2.$$

Якщо експериментально визначити x_{\max} , l , m , скористатися формулою (1) і відомим значенням λ , то з останньої рівності можна визначити ширину щілини:

$$b = (2m + 1) \lambda l / 2x_{\max}. \quad (3)$$

Порядок виконання роботи

1. Розташувати на оптичній лаві прилади відповідно до рис. 98.
2. Ретельно відцентрувати поперечним переміщенням конденсора освітлювача O зображення лампи розжарювання на щілину коліматора K . Домогтися найяскравішого зображення без світлофільтра.
3. Встановити на оптичній лаві дифракційну щілину $Щ$ з мікрометричним гвинтом, розкривши її до максимальної ширини.
4. Домогтися паралельності щілини коліматора та дифракційної щілини.
5. Переміщенням дифракційної щілини вздовж лави домогтися її різкого зображення на екрані.
6. Діставши різке зображення щілини на екрані, повільно зменшувати її ширину і спостерігати за появою дифракційної картини.
7. Встановити на оптичній лаві поряд з коліматором світлофільтр СС-2 ($\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м).
8. Сфотографувати дифракційну картину. Для цього замінити екран касетою, зарядженою фотопластинкою або фотопером. Час експозиції 5—10 хв.
9. Після вмикання світла виміряти відстань між дифракційною щілиною та екраном.
10. Проявивши фотоплір, підрахувати максимальну кількість темних смуг з одного боку від центральної.
11. Штангенциркулем виміряти відстань між крайніми темними смугами. Поділивши цю відстань навпіл, дістати значення x_{\max} .
12. Обчислити b за формулою (3) та оцінити точність проведених вимірювань.

Контрольні запитання

1. У чому полягає принцип Гюйгенса — Френеля?
2. Чим відрізняються умови спостереження дифракції Френеля і дифракції Фраунгофера?
3. Промені якої довжини хвилі при дифракції відхиляються від початкового напрямку найбільше?
4. Як змінюватиметься дифракційна картина на екрані при: а) поперечному зміщенні щілини; б) поперечному зміщенні лінзи (рис. 97)?

II. Вивчення дифракційної решітки

Прилади і матеріали: 1) оптична лавка; 2) дифракційна решітка; 3) масштабна лінійка з щілиною; 4) освітлювач ОИ-9; 5) світлофільтр КС-13.

Теоретичні відомості та опис приладів

Як відомо, дифракційна решітка у найпростішому випадку — це прозора пластина, на якій нанесено на однаковій відстані прозорі (щілини) і непрозорі (відстані між щілинами) штрихи однакової ширини. Таку решітку, як диспергуюча система, можна використати в спектральному приладі замість призми. Вона забезпечує більшу роздільну здатність та світлосилу порівняно з призмними спектрометрами тих же розмірів. Як і призму, дифракційну решітку встановлюють у паралельних променях. У випадку нормального падіння світла на прозору дифракційну решітку положення головних дифракційних максимумів визначається рівністю

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (1)$$

де d — період (або стала) решітки; φ — кут дифракції, тобто кут між нормаллю до решітки та напрямом на дифракційний максимум; λ — довжина світлової хвилі; m — порядок максимуму ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$); $d = a + b$, де b — ширина щілини, a — відстань між двома сусідніми щілинами.

Якщо на решітку падає потік білого світла, то при тому ж самому значенні $m \neq 0$ кути дифракції φ будуть неоднаковими для різних довжин хвиль λ , тобто спостерігатиметься розкладання білого світла в спектр. При $m = 0$ умова максимуму задовольняється для всіх довжин хвиль, тобто при $\varphi = 0$ спостерігається центральна світла смуга.

Розглянемо один з методів вивчення дифракційної решітки. Цей метод, схему установки якого наведено на рис. 99, полягає в тому, що через дифракційну решітку PP' розглядають щілину в масштабній лінійці MM' , закріпленій на екрані. При цьому крім яскравої щілини в площині екрана спостерігають дифракційний спектр або кольорові лінії при освітленні щілини монохроматичним світлом. Спектри m -х порядків утворюються по обидві сторони від щілини на однакових відстанях.

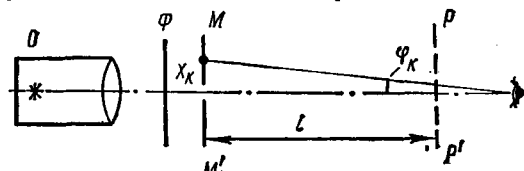


Рис. 99

У розглядуваному випадку роль лінзи L (рис. 97) відіграє кришталік ока, який фокусує промені, утворені в результаті дифракції на сітківці ока.

Якщо щілину освітити монохроматичним світлом з відомою довжиною хвилі, то згідно з (1) період решітки

$$d = m\lambda / \sin \varphi. \quad (2)$$

Тангенс кута φ_m , під яким спостерігається спектр m -го порядку, можна визначити з рис. 97:

$$\operatorname{tg} \varphi_m = x_m / l, \quad (3)$$

де x_m — відстань від щілини до спектра m -го порядку; l — відстань від екрана з щілиною до ока спостерігача (дифракційної решітки). В умовах даного методу $l \gg x_m$, тому можна покласти $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$. Тоді на основі (2) з урахуванням (3) маємо:

$$d = m\lambda l / x_m. \quad (4)$$

Найбільшого поширення дифракційна решітка дістала для визначення довжини світлових хвиль (за формулою (4) при відомій сталій решітки d).

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути освітлювач, освітити щілину. Спостерігаючи через решітку дифракційну картину, відрегулювати ширину щілини для утворення чітких і різких спектрів.

2. Дифракційну решітку та щілину розташувати на найбільшій відстані одна від одної та виміряти відстань l .

3. Встановити в оправу освітлювача світлофільтр КС-13 ($\lambda = 6,8 \cdot 10^{-7}$ м).

4. Виміряти на масштабній лінійці відстань між спектрами 2, 3, 4-го порядків ліворуч і праворуч від щілини. Результати вимірювань поділити на 2 і визначити x_m .

5. Для кожного значення m за формулою (4) обчислити сталу решітки та оцінити похибку вимірювань.

6. Вставити в оправу освітлювача світлофільтр з невідомою довжиною хвилі. Виконати вимірювання за п. 4 і обчислити довжину хвилі світлофільтра.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється дифракційний спектр від дисперсійного (призматичного)?
2. На що впливає значення сталої дифракційної решітки і як?
3. Як пояснюються основні та додаткові максимуми і мінімуми у дифракційному спектрі решітки?
4. Як виготовляються дифракційні решітки і якими вони бувають?

III. Визначення швидкості і довжини ультразвукових хвиль в рідинах оптичним методом

Прилади і матеріали: 1) генератор ультразвукових коливань УД-76; 2) оптична лавка; 3) освітлювач ОИ-9; 4) коліматор із світлофільтром КС-13; 5) збиральна лінза; 6) прозора плоскопаралельна кювета для рідини; 7) кварцетри-мач з кварцевою пластинкою; 8) відлікова оптична труба.

Теоретичні відомості та опис приладів

Ультразвуком називають пружні хвилі, частота яких перевищує верхню частотну межу чутності людського вуха (понад 18 кГц). Одним з методів їх утворення є зворотний *п'єзоелектричний ефект* на основі кварцевої пластинки.

Амплітуда деформаційних коливань кварцу досягає резонансних значень при умові збігу основної частоти власних коливань пластинки з частотою змінної напруги від високочастотного генератора. Якщо така пластинка контактує з кюветою, в якій знаходиться рідина, то ультразвукові коливання проходять крізь дно кювети і поширюються у рідині. На межі поділу рідина — повітря ультразвукові хвилі відби-

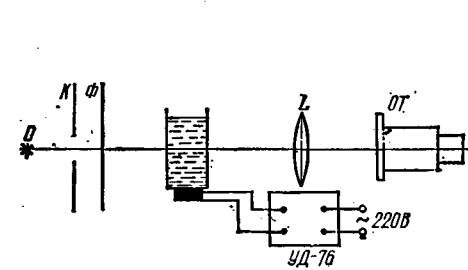


Рис. 100

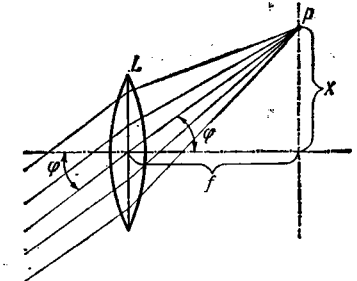


Рис. 101

ваються. Інтерференція біжучої та відбитої хвиль приводить до встановлення у рідині стоячої ультразвукової хвилі, яка зумовлює просторову неоднорідність рідини — періодичні розрідження та стиснення. Тобто в кюветі утворюються шари рідини з різними оптичними характеристиками. Періодичне просторове розташування неоднорідностей прозорої рідини подібне до *об'ємної* дифракційної решітки. Стала такої дифракційної решітки, тобто сума ширини прозорого та непрозорого проміжків, дорівнює довжині ультразвукової хвилі $\lambda_{узв}$. Якщо таку решітку освітити пучком монохроматичного або білого світла, на екрані спостерігатиметься дифракційна картина. Умова утворення дифракційних максимумів на екрані визначається співвідношенням

$$d \sin \varphi = m\lambda \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (1)$$

У даному випадку $d = \lambda_{узв}$. Тоді

$$\lambda_{узв} \sin \varphi = m\lambda. \quad (2)$$

Спостереження дифракції світла на ультразвукових хвилях здійснюються на установці, показаній на рис. 100.

На оптичній лаві у фокусі конденсора освітлювача O знаходиться коліматор K з світлофільтром Φ . Паралельний потік світла, який виходить із щілини коліматора в горизонтальному напрямі, освітлює плоскопаралельну кювету з рідиною. Дифрагуючі промені, що виходять з кювети, збираються лінзою L у фокальній площині та розглядаються за допомогою відлікової оптичної труби. У полі зору труби спостерігається кольорове зображення щілини при відсутності ультразвукових хвиль. Після включення генератора ультразвукових коли-

вань в кюветі утворюється стояча хвиля по висоті кювети

$$h = m\lambda_{\text{узв}}/2 \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

3) рівняння (2)

$$\lambda_{\text{узв}} = m\lambda/\sin \varphi. \quad (3)$$

Для знаходження $\sin \varphi$ розглянемо рис. 101. Паралельні промені, що утворюють максимум дифракції, збираються в точці P фокальної площини лінзи на відстані x від головної оптичної осі. З рис. 101 видно, що

$$x/f = \tan \varphi \approx \sin \varphi \quad (4)$$

(оскільки кут φ малий). Підставляючи (4) в (3), дістанемо

$$\lambda_{\text{узв}} = m\lambda f/x. \quad (5)$$

Швидкість ультразвукової хвилі можна підрахувати, знаючи частоту ультразвукових коливань:

$$v = \lambda_{\text{узв}} \nu. \quad (6)$$

Частота коливань генератора УД-76 дорівнює 2 МГц.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку за схемою рис. 100.
2. Заповнити кювету дистильованою водою. Рівень води мусить бути на 10 мм нижче висоти кювети. Кювету треба встановити строго перпендикулярно до напрямку світлового пучка. Широкі грані кювети повинні бути чистими. При встановленні кювети на кварцетримач її треба тримати за вузькі грані.

3. Від'юстувати систему і дістати вертикальним переміщенням відлікової оптичної труби та горизонтальним переміщенням лінзи різке зображення щілини.

4. Повністю закрити щілину, фіксуючи покази ноніуса мікрометричного гвинта. Поступово відкриваючи щілину, довести її ширину до 0,04—0,05 мм.

5. Ознайомившись з будовою ультразвукового генератора, включити його. Підібрати резонансну частоту коливань і за допомогою окуляра відлікової оптичної труби спостерігати різку дифракційну картину.

6. Переміщуючи у вертикальному напрямі відлікову оптичну трубу, виміряти відстань x між нульовим максимумом і максимумами 1, 2, 3-го порядків (ціна поділки шкали мікрометричного гвинта 0,01 мм).

7. Для кожного порядку спектра m і відповідного значення x , взявши у лаборанта значення λ і f , обчислити $\lambda_{\text{узв}}$ згідно з формулою (5) та швидкість ультразвукової хвилі згідно з (6).

Контрольні запитання

1. Чому стоячу ультразвукову хвилю можна вважати амплітудною дифракційною решіткою?
2. Чому період ультразвукової решітки дорівнює довжині біжучої, а не стоячої хвилі?
3. У чому полягає п'єзоелектричний ефект? Які ще існують методи одержання ультразвукових хвиль (крім п'єзоелектричного)?

20. Вивчення поляризації світла [22—24, заводські інструкції]

Поляризація світла — це властивість світла, яка характеризується просторово-часовою впорядкованістю орієнтації електричного і магнітного векторів. Під терміном «поляризація світла» розуміють також процес одержання поляризованого світла. Залежно від видів впорядкованості електричного вектора розрізняють: лінійну, еліптичну та колову поляризації. Досить зручно зображати поляризоване світло за допомогою лише одного електричного вектора, а його характер — у вигляді проекції траєкторії кінця цього вектора на площину, перпендикулярну до пучка. У випадку лінійно поляризованого світла така проекційна картина досить проста — це відрізок прямої під певним кутом φ до однієї з обраних осей (рис. 102, а). Кут φ називають азимутом поляризації.

Найпоширенішим на практиці є частково поляризоване світло. Його можна уявити так. Оберемо в площині, перпендикулярній до напрямку поширення світлового пучка, ортогональну систему координат x і y та спроекуємо на осі електричні вектори в даний момент. Підсумуємо всі x -компоненти і всі y -компоненти (рис. 102, б). Очевидно, у випадку природного світла при будь-якій орієнтації системи координат ці дві суми дорівнюють одна одній:

$$\sum x_i = \sum y_i.$$

У випадку частково поляризованого світла $\sum x_i \neq \sum y_i$. Частково поляризоване світло можна характеризувати величиною, що називається *ступенем поляризації* P . Якщо інтенсивність сумарної x -компоненти позначити I_x , а y -компоненти — I_y , то

$$P = [(I_y - I_x)/(I_y + I_x)] \cdot 100 \%$$

Для лінійно поляризованого світла $P = 100 \%$, а для природного $P = 0$. Можна дати таке означення частково поляризованого світла: це світло, що складається з природної та поляризованої складових.

1. Визначення кута Брюстера

Прилади і матеріали: 1) освітлювач ОИ-31; 2) діафрагма; 3) скляна пластинка; 4) непрозора пластинка з діелектрика; 5) фотоелемент; 6) гальванометр; 7) поляроїд.

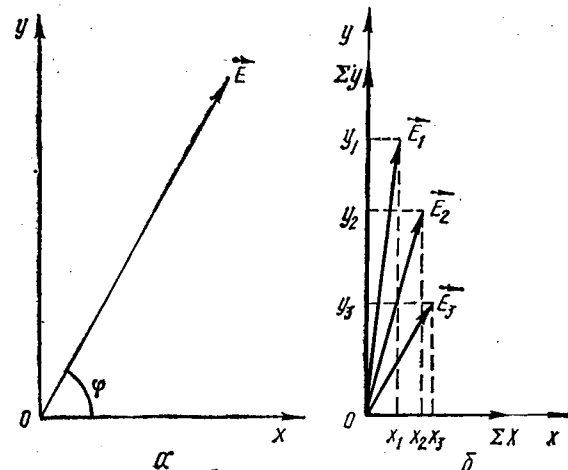


Рис. 102

Відомо, що часткова поляризація світла спостерігається при відбиванні від діелектриків. Якщо пропустити частково поляризоване світло через аналізатор, то при обертанні приладу навколо напрямку пучка інтенсивність світла, яке пройшло через нього, змінюватиметься в межах від I_{\max} до I_{\min} . I_{\max} відповідає розташуванню головної площини поляроїда вздовж осі y , а I_{\min} — вздовж x .

Уявімо частково поляризоване світло як сукупність двох лінійно поляризованих хвиль з різними амплітудами. Нехай в одній хвилі площина коливань збігається з площиною падіння (рис. 103, а), а у другій — з площиною, перпендикулярною до площини падіння

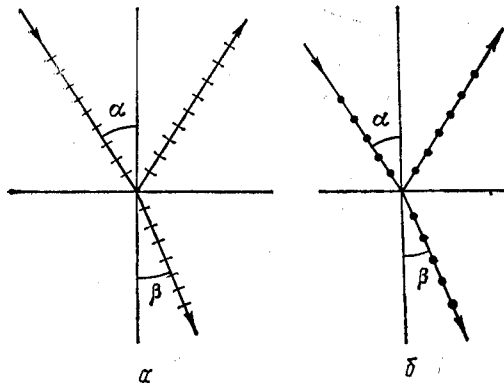


Рис. 103

(рис. 103, б). Інтенсивність цих хвиль позначимо відповідно I_{\parallel} та I_{\perp} . Досліджуючи залежність цих інтенсивностей від кута падіння, можна дістати інформацію про ступінь поляризації світла при відбиванні. Якщо відбиваючу поверхню освітлювати природним світлом, то

$$I_0 = I_{0\parallel} + I_{0\perp}.$$

Інтенсивності падаючого світла у взаємно перпендикулярних площинах однакові:

$$I_{0\parallel} = I_{0\perp}.$$

Відповідні інтенсивності відбитого світла дорівнюють:

$$I_{\perp} = I_{0\perp} \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}; \quad I_{\parallel} = I_{0\parallel} \frac{\lg^2(\alpha - \beta)}{\lg^2(\alpha + \beta)}.$$

Для сумарної інтенсивності відбитого світла маємо:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[\frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\lg^2(\alpha - \beta)}{\lg^2(\alpha + \beta)} \right].$$

З останньої формули видно, що $I = f(\alpha, \beta)$. Кут α і β пов'язані виразом $\sin \alpha / \sin \beta = n$, де n — показник заломлення відбиваючого діелектрика. При $n = \text{const}$ інтенсивність відбитих променів залежить тільки від кута падіння α . Аналіз наведених рівнянь показує, що коли $\alpha + \beta = \pi/2$, то $I_{\parallel} \rightarrow 0$, тобто у відбитому світлі цієї складової не бу-

де, а $I_{\perp} \neq 0$. При такому співвідношенні кутів має місце повна поляризація відбитого світла. Умову повної поляризації можна виразити в іншій формі, пов'язавши її з показником заломлення середовища. Замінивши у законі заломлення

$$\sin \beta = \sin((\pi/2) - \alpha) = \cos \alpha,$$

дістанемо: $\sin \alpha / \cos \alpha = n$, або

$$\lg \alpha = n = \sqrt{\epsilon}. \quad (1)$$

Останній вираз називається законом Брюстера, кут α — кутом повної поляризації, або кутом Брюстера.

Робота виконується на установці, зображений на рис. 104. Світло від джерела S проходить через діафрагму D , фокусуючу лінзу L і падає на пластину Π , закріплену в обоймі на столику з лімбом. Столик обертається для зміни кута падіння світла на пластинку. Після відбивання від пластинки світло попадає на фотоелемент, який реєструє інтенсивність пучка. Фотострум, пропорційний інтенсивності світла I , вимірюється гальванометром. Для дослідження інтенсивності світла з певною площиною коливань використовується поляроїд N . Лінія на оправі поляроїда позначає його головну площину. Кут падіння пучка визначається по лімбу при обертанні столика.

Порядок виконання роботи

1. Встановити лімб на нульову поділку при куті падіння світлового пучка на пластинку, що дорівнює нулю.

2. Виміряти залежність інтенсивності відбитого світла від кута падіння α окремо для I_{\parallel} та I_{\perp} за показами гальванометра. Напрям площини коливань встановлюється положенням поляроїда. Вимірювання зробити в інтервалі кутів падіння від 5 до 85°. Кути змінювати через кожні 5°.

3. Встановивши за попередніми вимірюваннями область мінімальних значень I_{\parallel} , зняти залежність $I_{\parallel} = f(\alpha)$ через кожні 1—2°. Визначити кут Брюстера та показник заломлення пластинки. Обчислити діелектричну проникність пластинки згідно з формулою (3).

4. Встановити певний кут падіння світлового пучка на пластинку. Обертаючи поляроїд, визначити максимальну та мінімальну інтенсивності відбитого світла. За цими даними визначити ступінь поляризації відбитого світла при даному куті падіння.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється поляризоване світло від природного? Охарактеризуйте основні методи одержання поляризованого світла.
2. Яке розташування площини коливань у відбитому та заломленому променях?
3. В якій площині коливається вектор \vec{E} світлової хвилі, відбитої від поверхні діелектрика під кутом Брюстера?
4. Як розташовані відбитий та заломлений промені при умові повної поляризації відбитого променя?

II. Перевірка закону Малюса

Прилади і матеріали: 1) два поляроїди; 2) лімб із шкалою 0—360°; 3) люксметр Ю—16; 4) джерело світла ОИ-18А.

Теоретичні відомості та опис приладів

Відомо, що будь-яку лінійно поляризовану хвилю можна розкласти на дві лінійно поляризовані хвилі з взаємно перпендикулярними площинами коливань. Нехай поляризатор Π (рис. 105) створює лінійно поляризоване світло з амплітудою \vec{E}_Π . Аналізатор A пропускає коливання, що збігаються з напрямом aa' . Кут між головними площинами поляризатора і аналізатора дорівнює α . Розкладемо вектор \vec{E}_Π на \vec{E}_\parallel , що збігається з напрямом aa' , та \vec{E}_\perp , перпендикулярний до цього

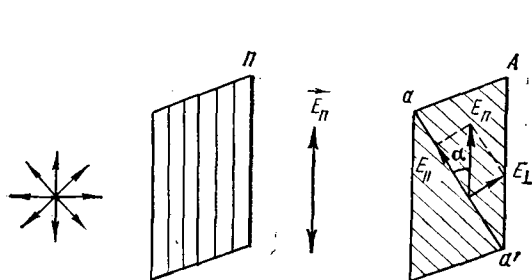


Рис. 105

напрямку. Коливання з амплітудою \vec{E}_\perp поглинаються аналізатором, а з амплітудою \vec{E}_\parallel проходять крізь нього. З рис. 105 маємо:

$$E_\parallel = E_\Pi \cos \alpha.$$

Але відомо, що око або фотоеlement реагує не на амплітуду коливань, а на інтенсивність світла, яка прямо пропорційна квадрату амплітуди хвилі: $I \sim E^2$.

Підносячи вираз для E_\parallel до квадрата та замінюючи квадрат амплітуди значенням інтенсивності, дістаємо закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha.$$

Якщо світло поляризоване, то I_0 — інтенсивність падаючого на аналізатор світла; α — кут між площиною коливання електричного вектора світла та головною площиною аналізатора; I — інтенсивність світла, яке проходить через аналізатор (поглинання в ньому не враховується). У випадку природного світла I_0 — інтенсивність світла, яке проходить через поляризатор і аналізатор при паралельних головних площинах; α — кут між головними площинами поляризатора і аналізатора; I — інтенсивність світла, яке проходить через поляризатор і аналізатор (поглинання в них не враховується). При поляризації світла у поляризаторі втрачається половина інтенсивності падаючого на нього світла. Отже, для системи поляризатор — аналізатор закон Малюса

записується так:

$$I = 0,5k^2 I_0 \cos^2 \alpha,$$

де I_0 — інтенсивність падаючого на аналізатор природного світла; k — коефіцієнт поглинання поляризатора та аналізатора. Поляризаційний прилад (рис. 106) складається з обійми з лімбом, в якій закріплено аналізатор. Під нею знаходиться поляризатор, закріплений на штативі. Джерело світла розташовується під поляризатором на основі штативу. Інтенсивність світла, що проходить крізь поляроїди, визначається за фотострумом люксметра, який закріплено над аналізатором.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути освітлювач в електричну мережу. Встановити мінімальну чутливість люксметра (перемикач в положенні 500 або 100).
2. Обертаючи лімб аналізатора, визначити максимальне значення освітленості люксметра і встановити нові межі його шкали.
3. Змінюючи покази лімба через кожні 10° в межах від 0 до 180°, зняти покази по шкалі люксметра. Обертання лімба виконати у двох напрямках.
4. Побудувати в полярних координатах залежність інтенсивності I від кута повороту аналізатора.

Контрольні запитання

1. Якими методами та за допомогою яких пристроїв можна одержати поляризоване світло?
2. Поясніть будову та поляризаційні властивості призми Ніколя та поляроїда.
3. Як зміниться освітленість екрана, якщо між двома схрещеними поляроїдами помістити третій, площина пропускання якого не збігається з площинами пропускання перших двох?

III. Визначення концентрації розчину цукру за допомогою поляриметра

Прилади і матеріали: 1) освітлювач ОИ-9; 2) поляриметр П-161; 3) колби з розчином цукру різної концентрації.

Теоретичні відомості та опис приладів

Одним з важливих у теоретичному і практичному відношеннях явищ молекулярної оптики, зокрема взаємодії поляризованого світла з речовиною, є явище *обертання площини поляризації*. Воно полягає у тому, що при проходженні монохроматичного поляризованого світла через деякі речовини обертається площина його поляризації. Це явище було виявлено для значної кількості речовин у різних агрегатних станах. Такі речовини названо *природними оптично активними речовинами*. До них належать кварц, розчин цукру, скипидар, камфора та ряд розчинів складних органічних сполук. Лінійно поляризоване світло при вході в оптично активну речовину внаслідок взаємодії з молекулами поділяється на дві частини. Промені однієї частини поляризовані по колу за годинниковою стрілкою, другої — проти годинникової

стрілки. При виході з речовини світло знов стає лінійно поляризованим. Але при проходженні через речовину промені з коловою поляризацією мають різні швидкості, а отже, і різні фази коливань. При їх складанні на виході з речовини результуючий лінійно поляризований промінь матиме площину поляризації, повернену на деякий кут порівняно з падаючим променем. Значення кута обертання площини поляризації при проходженні через таку речовину залежить від різниці швидкостей поширення поляризованих по колу променів, товщини шару середовища та, незначною мірою, від температури.

Кількісною мірою оптичної активності речовини є кут повороту площини поляризації. Цей кут у молекулярно активних речовинах (розчини) пропорційний концентрації c речовини в неактивному розчині:

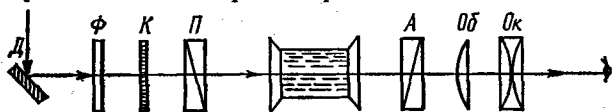


Рис. 107

ку, довжині оптичного шляху світла в цій речовині, а також залежить від природи самої речовини:

$$\varphi = \varphi_0 c l, \quad (1)$$

де φ_0 — питома оптична активність. Кут φ_0 залежить від довжини хвилі світла, температури, а також досить складно від природи розчинника у випадку його активності. Досить важливим є те, що φ_0 для даної речовини не залежить від її агрегатного стану. Вимірявши φ та знаючи φ_0 і l , можна визначити концентрацію даного розчину. Якщо ж питома оптична активність невідома, то користуючись (1) і вимірявши кут обертання площини поляризації розчином відомої концентрації, знаходять значення невідомої концентрації:

$$c = c_1 \varphi / \varphi_1. \quad (2)$$

Оскільки існує дисперсія кута обертання φ , то в приладах для його вимірювання використовують монохроматичне світло. Кут обертання площини поляризації вимірюють *поляриметрами*. Широкого поширення набули поляриметри для вимірювання концентрації цукрових розчинів.

У роботі використовується поляриметр П-161 з потрійним полем зору, оптичну схему якого наведено на рис. 107. У ньому застосовано принцип зрівнювання яскравостей поділеного на три частини поля зору. Поділ поля зору на три частини здійснюється введенням в оптичну схему приладу кварцевої пластинки K , яка займає лише середню частину поля зору. Зрівнювання полів відбувається поблизу повного затемнення поля зору, що відповідає майже повному схрещенню поляризатора та аналізатора.

Потік світла від освітлювача за допомогою дзеркала спрямовується на оранжевий світлофільтр Φ . Після нього потік поділяється на три частини. Середня частина пучка попадає на поляризатор Π після проходження кварцевої пластинки K , а дві крайні — безпосередньо на поляризатор. Зрівнювання яскравостей поля зору здійснюється повер-

танням аналізатора A . Вигляд поля зору в окулярі подається на рис. 108. Якщо між поляризатором і аналізатором помістити кювету з розчином цукру, який обертає площину поляризації, то нульова рівність яскравостей частини поля зору порушиться. Її можна відтворити обертанням аналізатора на кут, що дорівнює куту обертання площини поляризації розчином. Різниця двох відліків, що відповідають фотометричній рівновазі полів з оптично активним розчином і без нього, дорівнює куту обертання площини поляризації розчином даної концентрації.

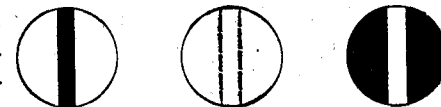


Рис. 108

Перед початком вимірювань кювету для розчинів необхідно вичистити та промити дистильованою водою. Після цього один кінець кювети закрити, а через другий заповнити досліджуванним розчином. Заповнення кювети проводиться до утворення на поверхні опуклого меніска. Цей меніск обережно зсувається вбік, при насунанні на торцеву частину кювети накривного скла. На скло накладається гумова прокладка, яка притискається втулкою з різьбою. У кюветі не повинно бути повітряної бульбашки.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою і принципом дії поляриметра П-161.
2. Підготувати кювету з відомою концентрацією розчину.
3. Вмістити у виріз колонки приладу кювету з дистильованою водою.
4. Спрямувавши світловий потік від освітлювача за допомогою дзеркала у прилад, через окуляр спостерігати фотометричне поле. Переміщенням окуляра досягти різного зображення ліній поділу поля зору.
5. Обертанням аналізатора домогтися рівномірного затемнення потрійного поля зору. У цьому найбільш чутливому положенні незначне обертання аналізатора веде до різкої зміни освітленості полів.
6. Рівномірну затемненість поля встановити 3—5 разів, кожного разу знявши покази по ноніусу градусної шкали. Середнє значення проведених відліків є нульовим відліком приладу, або поправкою на «0». Знак поправки (+, —) відносно нульового штриха ноніуса вважається додатним, якщо штрих зміщений за годинниковою стрілкою, і від'ємним — якщо проти годинникової стрілки.
7. Встановити у виріз колони кювету з розчином відомої концентрації і зробити вимірювання кута відповідно до пп. 5, 6. Спочатку записати кількість повних градусів повороту шкали аналізатора. Потім підрахувати кількість поділок від нуля ноніуса до штриха ноніуса, який збігається з штрихом градусної шкали. Ціна поділки шкали ноніуса дорівнює $0,1^\circ$.
8. Встановити у виріз колони приладу кювету з розчином невідомої концентрації. Згідно з пп. 4, 5, 6 визначити кут обертання площини поляризації. Таких вимірювань зробити не менш як 5—6. За формулою (2) обчислити невідому концентрацію.

Примітка. Якщо оптично активна речовина обертає площину поляризації більш як на 10° , то треба користуватися монохроматичним джерелом світла, оскільки без цього виникає помітне забарвлення полів, що ускладнює встановлення фотометричної рівності полів.

Контрольні запитання

1. Які речовини називають оптично активними?
2. Поясніть фізичний зміст явища обертання площини поляризації.
3. Для чого в поляриметрах використовують поділ поля зору?
4. Що таке питома оптична активність і від чого вона залежить?

IV. Дослідження оптичної анізотропії при механічних деформаціях

Прилади і матеріали: 1) оптична лавка з набором рейтерів; 2) набір світлофільтрів; 3) два ніколі в обертельних оправах; 4) слюдяна пластинка у чверть хвилі в обертельній оправі; 5) освітлювач ОИ-18; 6) ірисова діафрагма; 7) збиральна лінза; 8) зразок плексигласу (органічне скло) в оправі з рухомим затискачем; 9) екран.

Теоретичні відомості та опис установки

У багатьох ізотропних тілах (скло, плексиглас, бакеліт та інші полімери) під дією механічних деформацій (стиск, розтяг) виникає оптична анізотропія і пов'язане з нею подвійне променезаломлення — фотопружність. При одновісній деформації (наприклад, одновісний стиск) ізотропне тіло набуває оптичних властивостей, характерних для

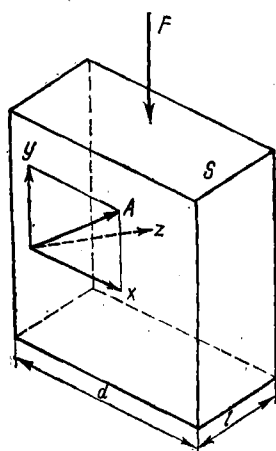


Рис. 109

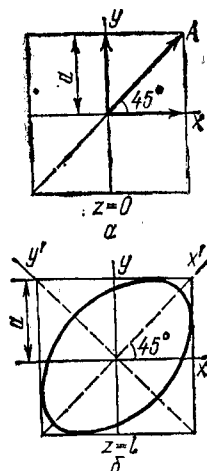


Рис. 110

одновісних кристалів, у яких визначальними є два показники заломлення n_0 і n_e .

Для малих одновісних стисків виконується лінійний закон Брюстера

$$\Delta n = n_0 - n_e = k\sigma, \quad (1)$$

де Δn — величина подвійного променезаломлення; $\sigma = F/S$ — меха-

нічна напруга (тиск); k — коефіцієнт фотопружності речовини (стала Брюстера).

Нехай на зразок речовини у формі паралелепіпеда (рис. 109) падає лінійно поляризоване світло в напрямі осі z . Площина коливань вектора A утворює з віссю y (вісь анізотропії — напрям сили тиску) кут α . Величина

$$\sigma = F/S = F/l d = \text{const.} \quad (2)$$

Різниця фаз світлових коливань вздовж осі y і перпендикулярно до неї

$$\delta = 2\pi (l/\lambda) (n_0 - n_e), \quad (3)$$

де λ — довжина хвилі падаючого світла.

На підставі (1) — (3) дістаємо:

$$k = \Delta n/\sigma = (\lambda d/2\pi F) \delta. \quad (4)$$

Визначення різниці фаз здійснюється так. На зразок падає лінійно поляризоване світло (вектор \vec{A}) вздовж осі z (рис. 110, а). Тоді перед зразком ($z = 0$)

$$\begin{aligned} x &= A \sin \alpha \cos \omega t = a \cos \omega t, \\ y &= B \sin \alpha \cos \omega t = b \cos \omega t. \end{aligned} \quad (5)$$

На довжині зразка ($z = l$) вздовж осі y фаза змінюється на величину δ . Тоді замість (5) матимемо такі рівняння коливання електричних векторів променів, що пройшли крізь пластинку:

$$x = a \cos \omega t; \quad y = b \cos (\omega t + \delta). \quad (6)$$

З рівнянь (6) знаходимо:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 - 2xy \cos \delta / ab = \sin^2 \delta. \quad (7)$$

Отже, після виходу із зразка речовини лінійно поляризоване світло стає еліптично поляризованим. При $\alpha = 45^\circ$ (як у розглядуваному випадку) $a = b$ і, отже,

$$x^2 + y^2 - 2xy \cos \delta = a^2 \sin^2 \delta. \quad (7a)$$

Як видно з рис. 110, б, кінець електричного вектора хвилі описує еліпс, вписаний в квадрат із стороною $2a$. Вісь еліпса утворює з осями x і y кути 45° . Його форма визначається різницею фаз δ ; при всіх значеннях δ головними осями еліпса є осі x' і y' .

Одержану еліптично поляризовану хвилю можна зобразити у вигляді суми двох взаємно перпендикулярних коливань вздовж осей x' і y' (різниця фаз між ними дорівнює $\pi/2$).

Якщо розмістити на шляху світла пластинку в чверть хвилі (насправді її виготовляють такою, що $\Delta \cdot nd = (m + 1/4) \lambda$, де m — ціле число) так, щоб її головні напрями збігалися з головними осями еліпса, то різниця фаз коливань скомпенсується, і світло знову стане лінійно поляризованим, при цьому площина коливань буде повернута на деякий кут φ (рис. 111).

Як видно з рис. 111,

$$\tan \varphi = b'/a'. \quad (8)$$

Довжини півосей еліпса a' і b' можна знайти після перетворення рівняння (7а) (повернувши осі на кут 45°). На основі відомих з аналітичної геометрії формул перетворень дістаємо:

$$a'_{11} = a_{11} \cos^2 \alpha + a_{22} \sin^2 \alpha + 2a_{12} \sin \alpha \cdot \cos \alpha,$$

$$a'_{22} = a_{22} \sin^2 \alpha + a_{11} \cos^2 \alpha - 2a_{12} \sin \alpha \cdot \cos \alpha.$$

При $\alpha = 45^\circ$

$$a'_{11} = 1 - \cos \delta \quad \text{і} \quad a'_{22} = 1 + \cos \delta.$$

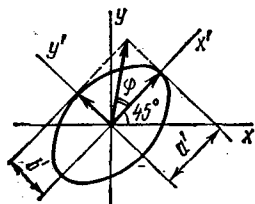


Рис. 111

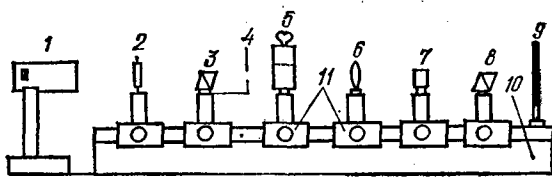


Рис. 112

Разом з цим $a'_{11} = 1/a'^2$, $a'_{22} = 1/b'^2$. Отже,

$$\operatorname{tg} \varphi = b'/a' = \sqrt{\frac{1 - \cos \delta}{1 + \cos \delta}} = \operatorname{tg} \delta/2.$$

Ввідки

$$\delta = 2\varphi, \quad (9)$$

тобто різниця фаз δ дорівнює подвійному куту повороту площини коливань, або, практично, подвійному куту повороту аналізатора, який визначає цю площину.

Установка для виконання роботи (рис. 112) складається з розміщених на оптичній лаві 10 освітлювача 1, світлофільтра 2 ($\lambda_{\text{сф}} = 550$ нм), двох ніколів в обертальній оправі — поляризатора 3 і аналізатора 8, преса для деформації зразка 5, пластинки 7 в чверть хвилі в обертальній оправі ($\lambda = 550$ нм).

Підсилення і послаблення світлового пучка фіксуються за зміною освітленості екрана 9. Рухома діафрагма 4 і збиральна лінза 6 є допоміжними пристроями.

Всі елементи установки можна переміщати вздовж оптичної лави за допомогою рейтерів 11. Робота виконується в затемненому приміщенні.

Порядок виконання роботи

1. Визначити головні напрями слюдяної пластинки в чверть хвилі.

1. Розмістити на оптичній лаві світлофільтр, поляризатор — ніколь (він закріплений в оправі так, що відмітка «0» відповідає вертикальній площині коливань), діафрагму, збиральну лінзу, екран.

2. Увімкнувши освітлювач, дістати за допомогою лінзи різке зображення діафрагми.

3. Розмістити на лаві аналізатор так, щоб він був схрещений з поляризатором; при цьому освітленість екрана повинна бути мінімальною.

4. Розмістити між схрещеними ніколями пластинку в чверть хвилі і знову домогтися мінімальної освітленості екрана; зафіксувати відповідну поділку на оправі пластинки. Визначити чотири такі положення пластинки, виконати креслення пластинки і провести прямі, які зображають її головні напрями.

5. Поворотом пластинки досягти того, щоб її головні напрями становили з площиною коливань кут 45° , і одержати світло, поляризоване по колу.

II. Визначити коефіцієнт фотопружності плексигласу.

1. Встановити поляризатор в положення «45», щоб площина коливань пучка світла, яке падає на зразок, становила з віссю анізотропії зразка кут 45° .

2. Зняти з оптичної лави пластинку в чверть хвилі; встановити у відповідний рейтер прес із зразком плексигласу і дістати зображення зразка на екрані.

3. Збільшивши навантаження на зразок (за вказівкою керівника занять), дістати еліптично поляризоване світло.

4. Переміщуючи прес уздовж вертикалі і використовуючи рухома діафрагму, виділити ділянку зразка, на якій ефект інтерференції голяризованих променів, що пройшли через зразок, виражений найсильніше (при схрещених ніколях освітленість такої ділянки, по можливості, повинна бути найбільшою; інтенсивність світла, звичайно, залежить від різниці головних напружень й орієнтації поляризатора і аналізатора відносно осей головних напружень). Вибравши таку ділянку, зменшити навантаження на зразок до нуля, і переміщуючи допоміжну лінзу, дістати на екрані різке зображення діафрагми.

5. На шляху світлового пучка поставити пластинку в чверть хвилі так, щоб один з її головних напрямів був розміщений в площині коливань світла, що падає на зразок; схрестити ніколи (повертати тільки аналізатор; поляризатор встановлено на поділці «45») і перевірити за освітленістю екрана правильність установки пластинки (див. п. 4 завдання I).

6. Збільшуючи навантаження на зразок, поворотом аналізатора для кожного збільшення навантаження (остання процедура регламентується вказівками керівника занять) домогтися мінімальної освітленості екрана; при цьому кожний раз фіксується по шкалі кут повороту аналізатора φ ($\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$), де φ_1 і φ_2 — кути, які відповідають початковому і наступному положенням аналізатора; $\delta = 2\varphi$.

7. Побудувати графік залежності $\delta(F)$. За кількома точками графіка і формулою (4) обчислити коефіцієнт фотопружності k .

8. Проаналізувати можливі джерела похибок вимірювань.

Контрольні запитання

1. Як пояснюється подвійне променезаломлення в кристалах?
2. Як побудована поляризаційна призма — ніколь?
3. Охарактеризуйте типи напрямлених зовнішніх збурень, які зумовлюють появу штучної оптичної анізотропії.

4. Як експериментально відрізнити: а) природне світло від поляризованого по колу; б) лінійно поляризоване світло від еліптично поляризованого?
5. У чому полягає інтерференція поляризованих променів?

21. Вивчення геометричної теорії оптичних зображень [22, 25, заводські інструкції]

Оптичні зображення дістають за допомогою спеціальних оптичних пристроїв — оптичних систем (сукупності лінз, дзеркал, призм тощо). Оптичні системи завдяки заломленню та відбиванню світлової хвилі змінюють її форму і обмежують фронт хвилі. Якщо світлові промені, які виходять з певної точки S , в результаті відбивання і заломлення в оптичній системі сходяться в точці S' , то остання називається оптичним зображенням (або просто зображенням) точки S .

В геометричній оптиці точка, що світиться, і світловий промінь є математичними поняттями. *Світловий промінь* — лінія, вздовж якої поширюється світлова енергія. Якщо промені виходять з однієї точки або збираються в одній точці, то пучок називається *гомоцентричним*. Зображення, утворене гомоцентричним пучком, називається *точковим* або *стигматичним*. Зображення, утворені перетином самих променів, називаються *дійсними*. Зображення, утворені перетином геометричних продовжень променів, називаються *уявними*.

Якщо центри кривизни поверхонь оптичної системи лежать на одній прямій лінії, то оптична система називається *коаксіальною*. Цю пряму лінію називають *головною оптичною віссю*. Промінь, що поширюється вздовж головної оптичної осі системи, проходить усі її поверхні без заломлення.

Велике значення в геометричній теорії оптичних систем і зображень мають *параксіальні* промені, які проходять нескінченно близько до оптичної осі або під дуже малими кутами до неї.

1. Визначення головної фокусної відстані збиральних і розсіювальних лінз

Прилади і матеріали: 1) оптична лаву з повзунками для розміщення освітлювача, екрана і лінз (або їх систем); 2) набір збиральних та розсіювальних тонких лінз; 3) освітлювач із закріпленим перед ним предметом, зображення якого утворюється на екрані; 4) екран із шкалою.

Теоретичні відомості та опис приладів

Лінза являє собою оптично прозоре тіло, обмежене з двох боків заломлюючими поверхнями. Якщо відстань між обмежуючими поверхнями в центрі лінзи набагато менша за радіуси їх кривизни, лінза називається *тонкою*. Лінзи бувають *двоопуклі* (збиральні), *двогнуті* (розсіювальні), *плоскогнуті* (розсіювальні), *опуклогнуті* (збиральні і розсіювальні). Радіуси кривизни сферичних поверхонь, які обмежують лінзу, R_1 і R_2 пов'язані з показником заломлення речовини лінзи n і головною фокусною відстанню її F таким співвідношенням:

$$D = 1/F = (n - 1) (1/R_1 - 1/R_2). \quad (1)$$

Важливою властивістю лінз є їх здатність давати зображення. При цьому для тонких лінз *головна фокусна відстань* їх F і *оптична сила* D

пов'язані з відстанями до предмета d і до зображення f співвідношенням

$$\pm D = \pm 1/F = 1/d \pm 1/f. \quad (2)$$

У цій формулі знак «+» відповідає збиральній, а знак «—» — розсіювальній лінзам.

Для дослідного визначення головних фокусних відстаней тонких лінз (або їх систем) використовують оптичну лаву 1 з півтораметровою шкалою 2, ціна поділки якої 1 мм (рис. 113).

На лаві закріплюється повзунок з освітлювачем і світним предметом 3 (освітлена електричною лампою діафрагма з отворами, розташованими по контуру стрілки); повзунок з досліджуваною лінзою 4 та

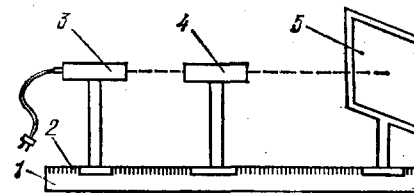


Рис. 113

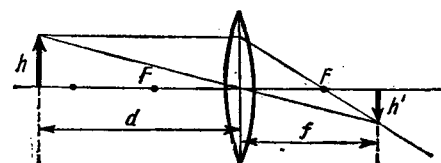


Рис. 114

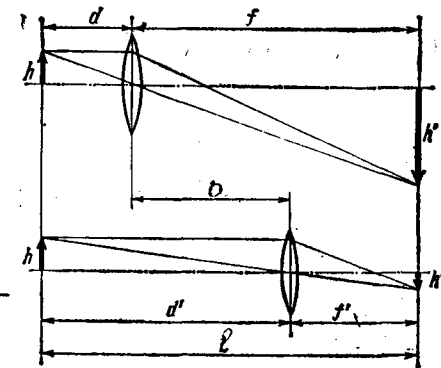


Рис. 115

повзунок з екраном 5. На повзунках є візирні покажчики, за допомогою яких визначається положення повзунків відносно шкали оптичної лави. Лінзи і предмет установлюють так, щоб центри їх були розташовані вздовж однієї осової лінії. Правильність установки перевіряють переміщенням лінзи вздовж оптичної лави. При такому переміщенні центр зображення на екрані не повинен зміщуватися.

Для характеристики зображення, утвореного лінзою, крім його положення потрібно знати і розмір зображення. За означенням поперечного збільшення та з рис. 114 можна записати, що

$$\Gamma = h/h' = d/f.$$

В цього виразу

$$d = (h/h') f.$$

Скориставшись формулою (2), знайдемо зв'язок розмірів предмета та його зображення з фокусною відстанню лінзи:

$$F = (h/(h + h')) f, \quad (3)$$

де h і h' — відповідно розміри предмета та його зображення на екрані.

Визначення фокусної відстані лінзи за формулами (2) і (3) потребує вимірювання кількох величин, що впливає на значення похибки результату цього непрямого вимірювання.

Бессель розробив метод вимірювання F з досить великою точністю за рахунок зменшення кількості змінних величин. Експериментально його здійснюють на установці, зображеній на рис. 113.

Визначають відстань L між предметом і екраном, на якому дістають різке зображення предмета при певних відстанях d і f (рис. 115). Потім переміщують лінзу в інше положення і знову дістають різке зображення того самого предмета на тому самому екрані, але вже при нових відстанях d' і f' . Вимірявши відстань між двома послідовними положеннями лінзи l і знаючи L , можна обчислити F .

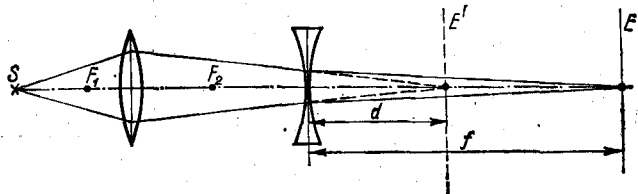


Рис. 116

Покажемо це. Оскільки в обох випадках на екрані зображення утворювалося за допомогою тієї самої лінзи, то з формули (2) можна записати:

$$df/(d+f) = d'f'/(d'+f') = F. \quad (4)$$

З рисунка видно, що $d+f = d'+f' = L$; отже,

$$fd = f'd', \quad (5)$$

$d' - d = f - f' = l$; звідси $d' = l + d$, а $f' = f - l$. Підставимо ці значення в (5): $fd = (f-l)(l+d)$ або

$$f - d = l.$$

Отже, для f і d маємо систему рівнянь

$$f - d = l; \quad f + d = L,$$

розв'язавши яку, дістанемо: $f = (L+l)/2$; $d = (L-l)/2$. Підставимо ці значення в (4), тоді

$$F = (L^2 - l^2)/4l. \quad (6)$$

Розсіювальні лінзи не дають дійсного зображення предмета на екрані. У цьому випадку для визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи створюють збиральну центральну систему із розсіювальної і збиральної лінз. При цьому на екрані дістають дійсне зображення предмета. Оптична сила такої системи лінз визначається формулою

$$1/F_c = 1/F_1 + 1/F_2 - d/(F_1 F_2), \quad (7)$$

де F_c — фокусна відстань системи лінз; F_1 , F_2 — фокусні відстані лінз, що входять в систему; d — відстань між головними площинами лінз, з яких складається система. Якщо лінзи досить тонкі і торкаються одна одної, то d можна вважати таким, що дорівнює нулю. Тоді оптична сила системи лінз дорівнює сумі оптичних сил лінз, які входять до цієї системи.

Можна зробити й інакше. Підбирають допоміжну збиральну лінзу з оптичною силою, більшою ніж у розсіювальній лінзі. За допомогою цієї збиральної лінзи дістають на екрані дійсне зображення предмета (рис. 116). Потім між екраном і збиральною лінзою поміщають розсіювальну лінзу на відстані d від екрана. При цьому різке зображення зникає. Переміщуючи екран на відстань f від розсіювальної лінзи, знову дістають різке зображення предмета. Оскільки роль предмета для розсіювальної лінзи відіграє зображення, утворене за допомогою збиральної лінзи, то для розсіювальної лінзи

$$F = df/(f-d). \quad (8)$$

Порядок виконання роботи

1. Визначити головну фокусну відстань збиральної лінзи.

А. Вимірюванням відстаней предмета і його зображення від лінзи.

1. Розмістити екран на достатньому віддаленні від світного предмета. Встановити між ними повзунок з лінзою і повільно переміщувати його до одержання на екрані різкого зображення. Зафіксувати по шкалі положення лінзи, предмета і екрана.

2. Змінити положення екрана і повторити дослід. Вимірювання провести не менш як 3 рази при різних положеннях предмета, екрана і лінзи.

3. Користуючись формулою (2) для збиральної лінзи, розрахувати головну фокусну відстань для кожного вимірювання, знайти середнє значення F і похибку вимірювання.

Б. За розмірами предмета, зображення і відстанню зображення від лінзи.

1. Помістити лінзу між екраном і світним предметом. Перемістити останній до одержання сильно збільшеного різкого зображення.

2. Виміряти розміри зображення h' і відстань зображення від лінзи (розміри предмета h задані). Вимірювання провести 3 рази для різного положення екрана.

3. Для кожної серії вимірювань обчислити F за формулою (3), знайти його середнє значення і обчислити похибку вимірювань.

В. Методом Бесселя.

1. Розмістити предмет і екран на оптичній лаві так, щоб відстань між ними була більшою за $4F$ (орієнтовно).

2. Помістити лінзу між предметом і екраном так, щоб на екрані було різке збільшене зображення предмета. Зафіксувати це положення лінзи по шкалі оптичної лави.

3. Не торкаючи предмета і екрана, знайти друге положення лінзи, при якому утворюється різке, але зменшене зображення предмета на екрані. Це положення також зафіксувати по шкалі.

4. Визначити відстань l як різницю двох зазначених переміщень.

5. Виміряти відстань L між екраном і предметом.

6. Змінити відстань між екраном і предметом.

7. Визначити середнє значення F з трьох вимірювань при різних L і l за формулою (6).

8. Обчислити похибку вимірювань.

II. Визначити головну фокусну відстань розсіювальної лінзи.

А. Методом створення збиральної центральної системи.

1. На установці, що дається на рис. 113, визначити методом Бесселя фокусну відстань розсіювальної лінзи (п. В завдання І).

2. Закріпити в одній оправі розсіювальну лінзу з невідомою фокусною відстанню і збиральну з відомою.

3. Визначити фокусну відстань системи F_c і за формулою (7) обчислити фокусну відстань розсіювальної лінзи. Досліди провести для трьох різних значень d .

Б. Методом подвійного фокусування.

1. Розмістити на оптичній лаві між предметом та екраном збиральну лінзу з довільною невідомою фокусною відстанню. Дістати різке зображення предмета і виміряти відстань між лінзою та екраном (це буде d для розсіювальної лінзи).

2. Між збиральною лінзою та екраном розмістити розсіювальну лінзу. Переміщуючи екран, дістати різке зображення предмета.

3. Виміряти відстань між розсіювальною лінзою і новим положенням екрана (це буде f для розсіювальної лінзи). За формулою (3) обчислити фокусну відстань розсіювальної лінзи.

4. Обчислити похибки вимірювання фокусної відстані розсіювальної лінзи обома методами і порівняти їх між собою.

Контрольні запитання

1. Вивести формули лінзи (1) і (2).
2. Чому не можна точно визначити фокусну відстань оптичної системи за формулою (2) завдання І?
3. Чому метод Бесселя точніший за прямі вимірювання d і f ? Чи застосовний метод Бесселя для товстих лінз?
4. Що називають оптичною силою лінзи і в яких одиницях її вимірюють?
5. З якою швидкістю і куди рухається зображення предмета, якщо він рівномірно віддаляється від лінзи з швидкістю v ?
6. Що називають збільшенням лінзи? Як визначають збільшення оптичної системи?

II. Визначення головної фокусної відстані сферичних дзеркал

Прилади і матеріали: 1) оптична лавка з шкалою; 2) вгнуте і опукле дзеркала на підставках; 3) екран; 4) освітлювач; 5) спиця довжиною 40—50 см і діаметром 2—3 мм на підставці; 6) спиця довжиною 40—50 мм і діаметром 10 мм на підставці.

Теоретичні відомості та опис приладів

Сферичними дзеркалами називаються відполіровані поверхні частин сфери, які дзеркально відбивають світло. Сферичні дзеркала бувають вгнутими і опуклими: у першому випадку дзеркальна поверхня звернута до центра кривизни, в другому — в протилежний бік.

Для визначення фокусної відстані F в геометричній оптиці використовують співвідношення для осевих променів, яке пов'язує відстань від світної точки до полюса дзеркала d , відстань від зображення до

дзеркала f і радіус кривизни дзеркала R :

$$1/d + 1/f = 2/R. \quad (1)$$

Для опуклого дзеркала

$$1/f - 1/d = 2/R. \quad (2)$$

Якщо предмет нескінченно віддалений ($d \rightarrow \infty$), то промені паралельні головній оптичній осі, і тоді $1/f = 2/R$, звідки

$$F = f = R/2. \quad (3)$$

З урахуванням (3) формулу (1) можна переписати так:

$$1/d + 1/f = 1/F. \quad (4)$$

Формули (1) і (4) є основними для дослідження сферичних дзеркал, за ними знаходять одну з трьох величин d , f , F , якщо дві інші відомі.

Крім цього, можна скористатися співвідношенням між розміром предмета h і його зображенням h' :

$$h/h' = (d - F)/F = F/(f - F). \quad (5)$$

Зазначені вище формули справедливі для параксіальних променів.

Порядок виконання роботи

І. Визначити головну фокусну відстань вгнутого сферичного дзеркала об'єктивним методом.

1. Дзеркало, предмет AB і екран E для одержання дійсного зображення предмета укріпити на рейтерах оптичної лави. По шкалі лави визначити відстані d і f з точністю до 1 мм. Як предмет можна взяти стрілку, вирізану в освітлювачі.

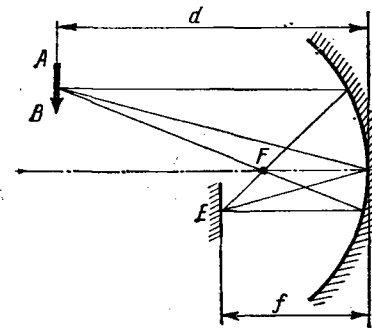


Рис. 117

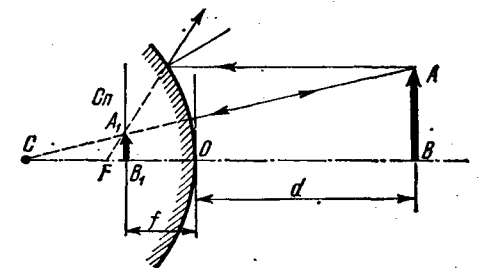


Рис. 118

2. Розмістити предмет від дзеркала на відстані, більшій за подвійну фокусну відстань. Пересуваючи екран, дістати різке зображення предмета на екрані (рис. 117).

3. Відрахувати по шкалі відстані d і f .

4. Виміряти висоту предмета h та висоту зображення h' .

5. Наблизити предмет до дзеркала, знову знайти різке його зображення на екрані і виміряти d , f , h , h' .

6. Дослід повторити 5—7 разів, змінюючи відстані предмета до дзеркала.

7. Користуючись формулами (4) і (5), обчислити середнє значення F . Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювання.

8. Порівняти значення відношень розмірів зображення до розмірів предметів. Перевірити, чи не спотворює дзеркало зображень.

11. Визначити головну фокусну відстань опуклого дзеркала методом відстані паралакса.

1. Поставити опукле дзеркало в рейтер оптичної лави.

2. На оптичній осі дзеркала на відстані 20 см від нього встановити спицю AB діаметром 8—10 мм (рис. 118).

3. Встановити за дзеркалом на відстані найкращого бачення від ока другу спицю Cn діаметром 2—3 мм.

4. Пересувати спицю AB вздовж головної оптичної осі опуклого дзеркала доти, поки зображення спиці AB в опуклому дзеркалі і спиці Cn не знайдуться на одній відстані від ока спостерігача. Це станеться тоді, коли зникне різниця між зображенням спиці AB в опуклому дзеркалі і спицею Cn при боковому переміщенні ока спостерігача відносно головної оптичної осі опуклого дзеркала.

5. Виміряти відстані d і f . За формулою (2) обчислити F .

6. Змінити відстань d спиці AB від дзеркала і повторити досліди (5—7 разів).

7. Обчислити середнє значення F . Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Чому при проведенні дослідів треба ставити предмет на відстані $d > 2F$?
2. Яке зображення утворюється у вгнутому дзеркалі при $F < d < 2F$ та при $F > d$? Де воно знаходиться? Побудувати зображення для всіх випадків.
3. Які дзеркала називаються вгнутими, які опуклими?
4. Побудувати зображення в опуклому дзеркалі при різних віддаленнях предмета.
5. Де застосовуються дзеркала?

III. Вивчення мікроскопа і зорової труби

Прилади і матеріали: 1) мікроскоп; 2) освітлювач; 3) окулярний мікрометр; 4) об'єктивний мікрометр; 5) масштабна лінійка; 6) оптична (або зорова) труба; 7) стінний масштаб; 8) рулетка.

Теоретичні відомості та опис приладів

Око людини здатне розрізняти дві близькі точки окремо одна від одної, якщо їх видно під кутом зору не менше однієї кутової хвилини. Кут зору можна збільшити, наближаючи предмет до ока. Проте це не завжди можливо (наприклад, для астрономічних об'єктів). Крім того, існує обмеження чіткого спостереження предмета при наближенні його до ока внаслідок існування границі акомодатії ока.

Розширити можливість ока можна за допомогою різноманітних оптичних приладів, від простих лінз (лупи) до складних їхніх систем. Для збільшення кута зору при розгляді дрібних об'єктів служать мікроскопи, а при розгляді макроскопічних, але віддалених об'єктів — зорові труби (телескопи).

Мікроскоп. В сучасних мікроскопах можна виділити дві частини: механічну і оптичну (рис. 119). До механічної належать основа 1, тубусотримач 10, гвинт 11 для грубого фокусування мікроскопа, предметний столик 5, тубус 8, ірисова діафрагма 3 для регулювання освітлення об'єкта, механізм тонкого фокусування мікроскопа 12, револьвер 7 з закріпленими в ньому об'єктивами. Оптична частина складається з дзеркала 2 і конденсора 4, змінних об'єктивів 6 та окуляра 9. Дзеркало 2 з внутрішнім срібленням має дві сторони, на одній з них — плоска відбиваюча поверхня, а на другій — угнута. Угнуте дзеркало застосовується у мікроскопах слабкого збільшення без конденсора, а плоске — разом з конденсором. Основне призначення освітлювальної системи мікроскопа — створення рівномірно освітленого поля зору мікроскопа. Крім того, роздільна здатність мікроскопа залежить від апертури об'єктива (половина кута між крайніми променями, що йдуть від об'єкта до країв об'єктива). Діафрагма 3 конденсора 4 відіграє роль зрачка входу конденсора. Вона зображується у фокальній задній площині об'єктива. Це зображення її окуляром мікроскопа дає зрачок виходу всього мікроскопа. Змінюючи отвір ірисової діафрагми, можна впливати на розмір апертури об'єктива, що допомагає усунути зайве розсіяне світло. Об'єктив являє собою складну багатолінзову оптичну систему (до 12—13 лінз), поміщену в оправу. Головну роль в одержанні збільшеного зображення відіграє передня, або так звана фронтальна лінза, інші ж служать для усунення недоліків зображення і називаються корегуючими.

Об'єктиви мікроскопів — короткофокусні (1,5 мм і більше), а їх збільшення лежать в межах від 10 до 100.

Окуляр являє собою складну лупу, до якої входить верхня окулярна лінза і нижня збиральна. Лінзи розташовані на відстані, що дорівнює півсумі їх фокусних відстаней. Ця оптична система також міститься в оправі. Окремі окуляри забезпечуються окулярним мікрометром — прозорою пластинкою, на якій нанесено шкалу з певною ціною поділки. Розміщують окулярний мікрометр поблизу фокальної площини окуляра. Окуляр виготовляють з фокусними відстанями від 0,85 до 12 см і збільшенням від 2 до 25.

Підбираючи різні об'єктиви і окуляри, збільшення мікроскопа можна змінювати в широких межах.

Досліджувані предмети кладуть на предметний столик 5. Якщо вони прозорі, спостереження ведеться в прохідному світлі і освітлення

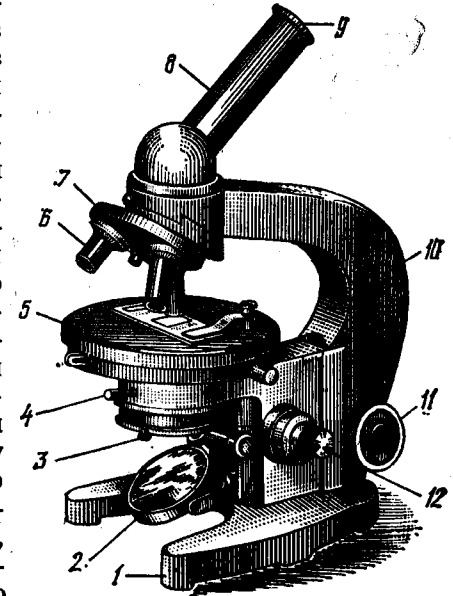


Рис. 119

здійснюється за допомогою дзеркала 2 і конденсора 4. Непрозорі предмети спостерігають у відбитому світлі при освітленні їх з боку об'єктива за допомогою спеціального освітлювача.

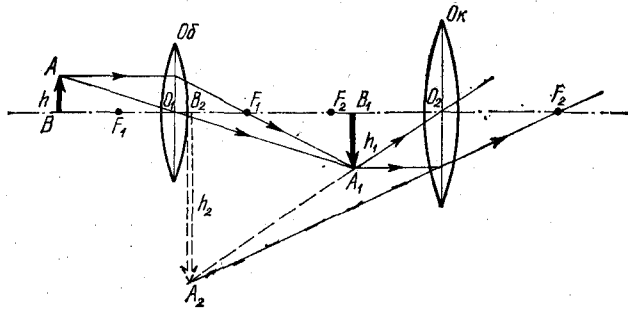


Рис. 120

Принципіальну схему побудови зображення в мікроскопі подано на рис. 120. Досліджуваний предмет AB розміщують недалеко за фокусом об'єктива F_1 . Його натуральна лінійна величина h . Об'єктив дає збільшене перевернуте дійсне зображення предмета A_1B_1 за подвійним фокусом об'єктива. Величина зображення h_1 . По відношенню до окуляра зображення A_1B_1 є предметом. Окуляр розміщують так, щоб зображення A_1B_1 попадало між його оптичним центром і фокусом.

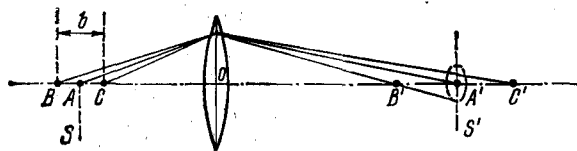


Рис. 121

Отже, кінцеве зображення h_2 буде уявним і відносно предмета AB перевернутим і збільшеним. Зображення A_2B_2 знаходиться на відстані найкращого бачення.

Виведемо формулу для збільшення мікроскопа. Позначимо збільшення об'єктива k_1 , окуляра k_2 , а загальне збільшення мікроскопа k . З рис. 120 маємо:

$$k_1 = h_1/h = O_1B_1/O_1B; \quad k_2 = h_2/h_1 = B_2O_2/B_1O_2;$$

$$k = h_2/h = O_1B_1 \cdot B_2O_2/O_1B \cdot B_1O_2.$$

Щоб збільшення мікроскопа було максимально можливим, беруть $O_1B \approx F_1$; $B_1O_2 \approx F_2$. При цьому $O_1B_1 = F_1 + \delta$, де δ — відстань між головними фокусами об'єктива і окуляра, яка практично дорівнює довжині труба мікроскопа. Позначимо відстань найкращого бачення $B_2O_2 = L$ (L для нормального ока дорівнює 25 см). Оскільки $F_1 \ll \delta$, то можна вважати, що $O_1B_1 = \delta$ — оптична довжина мікроскопа. Отже, формула збільшення мікроскопа набирає такого вигляду:

$$k = k_1k_2 = L\delta/F_1F_2. \quad (1)$$

Важливою характеристикою мікроскопа є його здатність давати роздільне зображення двох сусідніх об'єктів. Роздільна здатність мікроскопа, як і всіх оптичних приладів, обмежена хвильовою приро-

дою світла (дифракційними явищами) і залежить лише від числової апертури об'єктива A і довжини світлової хвилі λ . Числова апертура об'єктива A визначається вхідним зрачком об'єктива, який обмежує конус променів, що входять в об'єктив.

Враховавши, що площа зображення, яке створює об'єктив, лежить на відстані, значно більшій ніж діаметр об'єктива, промені у просторі зображення можна вважати паралельними. Застосовуючи формули Фраунгофєрової дифракції на апертурній діафрагмі об'єктива, дістають вираз для роздільної здатності мікроскопа:

$$\Delta = 0,61\lambda/A. \quad (2)$$

Отже, як впливає з формули (2), роздільну здатність мікроскопа можна підвищити, збільшуючи числову апертуру об'єктива A або зменшуючи довжину хвилі λ . Часто для збільшення апертури об'єктива простір між об'єктом і фронтальною лінзою заповнюють імєрсійною рідиною (імєрсійне масло з $n = 1,515$, вода, водний розчин гліцерину). При цьому апертура збільшується в n раз. Іноді для збільшення роздільної здатності мікроскопа використовують ультрафіолетове освітлення.

Для практичного визначення роздільної здатності мікроскопа і зорових труб користуються штриховими тест-таблицями — мірами. Штрихова міра являє собою групу сімейств (квадратів), по-різному розміщених у вигляді матриці. Штрихи сімейств у кожному рядку орієнтовані один відносно одного під кутом 45° . У межах одного сімейства штрихи паралельні і однакої за шириною. Таких груп сімейств буває, як правило, 16 або 25. Ширина штрихів від групи до групи зростає у геометричній прогресії.

Оскільки роздільна здатність мікроскопа обмежена, то і його збільшення також обмежене певним максимумом, який називають корисним збільшенням. Розрахунки показують, що корисне збільшення мікроскопів не може перевищувати 1000.

Важливою характеристикою мікроскопа є глибина різкого зображення.

Геометричні точки об'єкта (рис. 121, точка A), що лежать в площині S , на яку сфокусовано мікроскоп, проектується в площині зображення S' у вигляді точки A' . Точки B і C , які лежать нижче від площини фокусування або вище від неї, проектується на площину зображення у вигляді кругів розсіяння. Чим далі точки B і C від площини фокусування, тим більшим буде круг розсіяння. Шар, для площини якого кут величина кругів розсіяння не перевищує роздільної здатності ока, сприймається різким (шар BC). Його товщину називають геометричною глибиною зображення b :

$$b = 2L/k^2. \quad (3)$$

Отже, при збільшенні k швидко зменшується глибина різкого зображення.

Зорові труби. Прилади, які дають змогу розглядати предмети, що знаходяться на значній відстані, називають телескопічними. До них належать такі, що вимірюють координати рухомих цілей, — дальноміри та висотоміри, велика група геодезичних приладів: нівел-

ліри, теодоліти та інші, за допомогою яких визначають координати точок на земній поверхні. Відрізняє телескопічні системи від інших оптичних систем те, що промені в систему входять у вигляді паралельного пучка і виходять з неї теж у вигляді паралельних пучків.

Предмети спостерігаються у вигляді зображень, утворених оптичною системою, під значно більшими кутами, ніж при розгляданні їх неозброєним оком.

Найпростіша телескопічна оптична система складається з двох елементів: об'єктива та окуляра. Дістати паралельність спряжених пучків променів у просторі, предметів та зображень у просторі можна лише

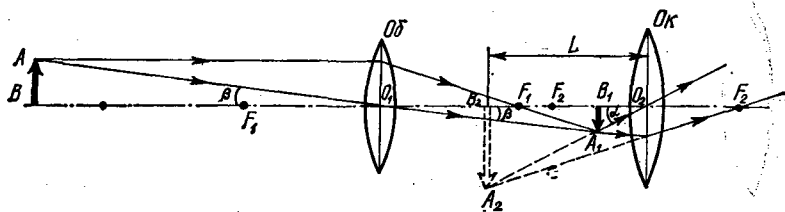


Рис. 122

тоді, коли задній фокус об'єктива збігається з переднім фокусом окуляра. Оптична довжина такої системи дорівнює сумі фокусних відстаней об'єктива і окуляра.

Якщо в окулярі використовується додатна система лінз або одна лінза, що дає обернене зображення, то така оптична система називається системою Кеплера (наприклад, зорові труби геодезичних та астрономічних приладів).

Якщо в окулярі використана від'ємна лінза або система лінз, то така оптична система називається системою Галілея. Основне її застосування — біноклі. Вона дає пряме зображення, характеризується малим полем зору. Певною перевагою такої системи є скорочення оптичної довжини всієї системи. При однакових фокусних відстанях об'єктива та окуляра система Галілея коротша за систему Кеплера на дві фокусні відстані окуляра.

Головними оптичними характеристиками телескопічної системи є: видиме збільшення N , поле зору β , збиральна здатність труби C , роздільна здатність труби.

Зорова труба складається з довгофокусної лінзи, оберненої до предмета (об'єктива), і окуляра (рис. 122). Об'єктив дає дійсне, перевернуте і зменшене зображення A_1B_1 предмета AB .

Окуляр виконує роль лупи і дає уявне, пряме і збільшене зображення щодо A_1B_1 . Зображення знаходиться на відстані найкращого бачення L (25 см).

Кутове збільшення зорової труби

$$N = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta,$$

де α — кут, під яким зображення предмета розглядається в зоровій трубі; β — кут, під яким предмет видно неозброєним оком.

Якщо зорову трубу наведено на нескінченність, то $O_1B_1 \approx F_1$; $O_2B_1 \approx F_2$.

$$\operatorname{tg} \alpha = A_2B_2/O_2B_2 = A_1B_1/O_2B_1;$$

$$\operatorname{tg} \beta = AB/O_1B = A_2B_1/O_1B_1.$$

Звідси

$$N = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta = A_1B_1/O_2B_1; \quad A_1B_1/O_1B_1 = F_1/F_2. \quad (4)$$

Основні характеристики телескопічних систем (збільшення кута зору, велика роздільна здатність, велика світлосила) залежать від якості та діаметра їхніх об'єктивів. Діаметри світлових пучків відповідають діаметрам вхідного та вихідного зрачків. Вхідний зрачок визначається діаметром об'єктива телескопічної системи, який можна збільшувати, виходячи з конкретних умов застосування. Вихідний зрачок як зображення оправи об'єктива, створеного окуляром, не може бути більшим за діаметр зрачка ока. Тому збільшення кута зору системи буде прямо пропорційним значенню діаметра об'єктива. Якщо зображення віддаленого об'єкта спостерігається оком (а не фотографується), то оптимальне зорове враження («зорова яскравість») буде тоді, коли зрачок ока цілком заповнюється конусом променів, які проходять через кожну точку зображення. При цьому буде досягнуто максимальної яскравості зображення на сітківці ока, яку не можна збільшити жодними допоміжними оптичними засобами, оскільки будь-які пучки світла з великою апертурою обмежуватимуться тією самою діафрагмою — зрачком ока. Збиральна здатність телескопічної системи визначається відношенням площі поверхні об'єктива до площі зрачка ока:

$$C = S_{\text{об}}/S. \quad (5)$$

Полем зору називають найбільшу кутову відстань, яку одночасно видно в трубу

$$\operatorname{tg} \beta = S/l. \quad (6)$$

При малих кутах $\beta = S/l$ (β — в радіанах), де S — найбільша довжина видимої в трубу частини масштабної шкали (в сантиметрах), підвищеної на відстані l від об'єктива труби.

Роздільна здатність зорових труб, так само як і мікроскопа, обмежена явищем дифракції. Розрахунки показують, що роздільна здатність труби R визначається співвідношенням між апертурою D труби і довжиною хвилі світла λ . Отже,

$$R = k(D/\lambda), \quad (7)$$

де k — коефіцієнт пропорційності ($k = 0,41 \cdot 10^{-5}$). Чим менша апертура, тим сильніший вплив дифракції і менше R .

Порядок виконання роботи

А. Мікроскоп.

1. Ознайомитися з будовою мікроскопа, призначенням всіх його деталей та одержати зображення мікроскопічних об'єктів при різних збільшеннях мікроскопа.

1. Розмістити на предметному склі столика мікроскопа краплину води із сферичними полімерними частинками мікроскопічних розмірів (5—50 мкм). Накрити краплину покривним склом і провести дослідження.

2. Добитися максимального освітлення об'єкта поворотом дзеркальця і переміщенням конденсора.

3. Опускаючи тубус мікроскопа за допомогою мікрогвинтів грубого і тонкого наведення, добитися різкого зображення полімерних частинок.

4. Провести ці дослід для різних збільшень мікроскопа, міняючи об'єктиви та окуляри.

II. Визначити збільшення мікроскопа.

1. Покласти на предметний столик мікроскопа об'єктивний мікрометр (скляну пластинку, на яку нанесено шкалу з ціною поділки 0,01 мм), сфокусувати мікроскоп і дістати різке зображення поділок шкали.

2. Збоку від мікроскопа на відстані найкращого бачення (25 см) поставити вертикально масштабну лінійку з ціною поділки 1 мм.

3. На окуляр мікроскопа під кутом 45° до осі поставити дзеркало і встановити його так, щоб одночасно бачити зображення шкали об'єктивного мікрометра і шкали вертикальної масштабної лінійки.

4. Відрахувати кількість цілих поділок N_1 шкали масштабу, які збігаються з цілим числом поділок N_2 зображення шкали мікрометра. Оскільки відношення ціни поділки шкали до ціни поділки мікрометра дорівнює 100, то збільшення мікроскопа визначається як

$$k = (N_1/N_2) \cdot 100.$$

5. Порівняти вимірне збільшення мікроскопа з обчисленим за формулою (1).

6. Визначити ціну поділки окулярного мікрометра C , помістивши на предметний столик об'єктивний мікрометр з відомою ціною поділки C' , сумістивши кілька його поділок N з n поділками окулярного мікрометра. Тоді $C = (N/n) C'$.

7. Помістити замість об'єктивного мікрометра дротини різного перерізу і за відомою ціною поділки окулярного мікрометра визначити їх діаметри.

8. Повторити аналогічні вимірювання для сферичних полімерних частинок (наприклад, для частинок полістиролу).

9. Виміряти діаметр дротини механічним мікрометром і, знаючи ціну поділки окулярного мікрометра, обчислити збільшення мікроскопа.

III. Визначити роздільну здатність мікроскопа.

1. Встановити міру перед об'єктивом мікроскопа, освітити міру і дістати різке її зображення.

2. Знайти залежність найменшої роздільної відстані від збільшення різних окулярів. Величина найменшої роздільної відстані визначається за допомогою таблиці (номер останнього квадрата міри, штрихи якого ще видно роздільно).

3. Для окуляра відомого збільшення знайти роздільну здатність в червоних і синіх променях (скориставшись світлофільтрами).

4. Порівняти одержані дані Δ з розрахованими за формулою (2), знаючи апертуру для кожного об'єктива і довжину світла.

5. Повторити дослід для інших об'єктивів.

IV. Визначити глибину різкого зображення.

1. За допомогою мікрометричного гвинта визначити величину пере-

іщення мікроскопа відносно об'єкта в межах його різкого зображення. Найкраще це зробити, сфокусувавши мікроскоп в кювету, де є суспензія мікроскопічних частинок. Знаючи збільшення мікроскопа, обчислити глибину різкого зображення b за формулою (3) і порівняти його з вимірним значенням.

Б. Зорова труба.

1. Визначити збільшення зорової труби.

1. Ознайомитися з будовою зорової труби і призначенням окремих її вузлів.

2. Навести трубу на масштабну лінійку, що висить на стіні.

3. Поруч з трубою на відстані 25—30 см від ока встановити вертикально на штативі таку ж шкалу і добре її освітити.

4. Добитися, щоб в полі зору були одночасно обидва масштаби (краще це зробити за допомогою рисувального приладу або призми, надітих на окуляр труби).

5. Порівнюючи зображення настінної шкали з шкалою в трубі, обчислити величину зображення $A'B'$ і дійсну довжину видимої частини шкали AB .

6. За формулою $k = (A'B' \cdot l)/(AB \cdot l_1)$, де l — відстань від ока до шкали на стіні, а l_1 — відстань від ока до зображення шкали (25 см), обчислити збільшення зорової труби k .

7. Провести дослід кілька разів при різних відстанях. Обчислити середнє значення k і порівняти його з обчисленим за формулою (4).

8. Накреслити хід променів в трубі, наведений на віддалений предмет.

II. Визначити збиральну здатність зорової труби.

1. Виміряти діаметр зорової труби і обчислити її збиральну здатність за формулою (5), приймаючи діаметр зрачка ока за такий, що дорівнює 5 мм.

2. Обчислити збиральну здатність телескопа, діаметр об'єктива якого дорівнює 1 м.

III. Визначити поле зору труби.

1. Навести трубу на масштабну шкалу і заміряти довжину шкали, видиму в трубу S .

2. Рулеткою заміряти відстань l від об'єктива труби до шкали.

3. За формулою (6) обчислити величину поля зору труби.

4. Проробити дослід при різних відстанях l і обчислити середнє значення β .

IV. Визначити роздільну здатність зорової труби.

1. Встановити міру на відстані 2—3 м від об'єктива труби і добре освітити лампою. Сфокусувати трубу і одержати різке зображення міри.

2. Визначити номер великого квадрата, штрихи якого ще видно роздільно. За таблицями визначити відстань a між штрихами цього квадрата при фіксованій відстані b від міри до об'єктива труби.

3. Обчислити граничну кутову відстань $\varphi = a/b$, а також роздільну силу $R = 1/\varphi = b/a$. Порівняти здобуті результати з обчисленими за формулою (6) ($\lambda = 550$ нм).

4. Перевірити залежність R від апертури D і довжини хвилі λ , скориставшись різними об'єктивами і світлофільтрами.

Контрольні запитання

1. Накреслити хід променів в мікроскопі і в зоровій трубі.
2. Вивести формули збільшення мікроскопа і зорової труби.
3. Як визначається ціна поділки окулярного мікрометра мікроскопа?
4. Як визначити розміри мікрооб'єктів за допомогою мікроскопа?
5. Чим визначається гранична роздільна здатність мікроскопа; зорової труби?
6. Які вимоги ставляться до об'єктива і окуляра розглянутих приладів?
7. У чому полягає фокусування зорової труби?
8. Чи можна за допомогою телескопа бачити зірки вдень?
9. Порівняти роздільну здатність ока і труби.

IV. Визначення показника заломлення прозорих твердих тіл за допомогою мікроскопа

Прилади і матеріали: 1) мікроскоп типу М-9; 2) набір прозорих твердих пластинок різної товщини (скло різного сорту, оргскло тощо); 3) освітлювач в наборі світлофільтрів; 4) мікрометр з ціною поділки 0,01 мм.

Теоретичні відомості та опис приладів

Згідно із законом заломлення світла: заломлений промінь лежить в площині падіння; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох прозорих середовищ залежить лише від довжини світлової хвилі і не залежить від кута падіння:

$$\sin \beta / \sin \alpha = n_{21} = v_1 / v_2,$$

де величина n_{21} називається *відносним показником заломлення* другого середовища відносно першого; він ще визначається відношенням швидкості поширення світла в першому середовищі v_1 до швидкості світла в другому середовищі v_2 .

Показник заломлення середовища відносно вакууму називають *абсолютним показником* (коефіцієнтом) заломлення цього середовища:

$$n = \sin \beta / \sin \alpha = c / v,$$

де α — кут падіння; β — кут заломлення; c — швидкість світла у вакуумі; v — швидкість світла в даному середовищі.

Оскільки швидкість світла в повітрі близька до швидкості його у вакуумі, то показник заломлення середовища, вимірюваний відносно повітря, практично дорівнюватиме абсолютному показникові заломлення цього середовища. Для повітря при тиску 1010,8 гПа і температурі 293 К $n = 1,000274$.

Оскільки n залежить від частоти (довжини хвилі) падаючого світла, то його прийнято нормувати до лінії натрію D і записувати n_D . Часто індекс D опускають, маючи на увазі згадану вище умову.

При великих інтенсивностях падаючого світла (лазерні промені) показники заломлення оптичних середовищ нелінійно залежать від інтенсивності світла. Такий характер цієї залежності спостерігається тоді, коли напруженість електричного поля падаючої хвилі порівнянна з напруженістю поля всередині атомів речовини.

У зв'язку з труднощами безпосереднього вимірювання кутів падіння і заломлення світлових променів розроблено інші методи визначення n . У даній роботі розглядається метод визначення показника за-

ломлення прозорої твердої плоскопаралельної пластинки за допомогою мікроскопа для монохроматичного та білого світла.

Розглянемо шар прозорої речовини, обмеженої двома плоскопаралельними поверхнями NN та MM (рис. 123). Нехай товщина шару d . Якщо розглядати шар зверху в мікроскоп, то здаватиметься, що нижня поверхня шару займає положення $N'N'$. Це можна показати, побудувавши зображення кожної точки площини NN . Якщо на нижню поверхню пластинки нанести тонку подряпину S , то вона буде джерелом розсіяних променів. Розглянемо два промені SAK і SBL , які розходяться під малим кутом, оскільки в протилежному випадку вони не попадуть в об'єктив мікроскопа. На верхній поверхні розділу речовина — повітря (лінія MM) обрані промені переходять в оптично менш густе середовище, а отже, розходяться ще більше. Для спостерігача, який дивиться вздовж нормалі PS , промені AK і BL перетнуться на продовженні в точці S' — уявному зображенні точки S .

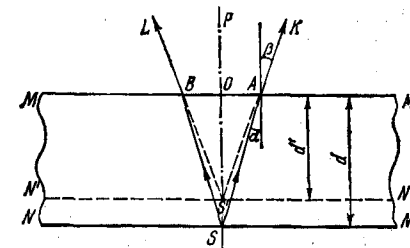


Рис. 123

Сукупність точок, аналогічних S' , утворює уявне зображення поверхні NN . Як видно з рисунка, уявна товщина пластинки менша за дійсну товщину d .

Покажемо, що абсолютний показник заломлення шару прозорої твердої речовини можна обчислити, вимірявши дійсну d і уявну d' товщину пластинки. Справді, з трикутника OSA запишемо: $OA = OS \cdot \operatorname{tg} \alpha$, з трикутника $OS'A$: $OA = OS' \cdot \operatorname{tg} \beta$. Тому

$$OS/OS' = \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha = \sin \beta / \sin \alpha.$$

Заміна тангенсів відповідних кутів на їх синуси можлива внаслідок малості кутів α і β .

З останнього співвідношення можна визначити також абсолютний показник заломлення речовини пластинки. Оскільки $OS = d$, $OS' = d'$, то

$$n = d/d'.$$

Порядок виконання роботи

1. За допомогою освітлювача та дзеркала мікроскопа добитися рівномірної оптимальної яскравості поля зору в окулярі.

2. Покласти на предметний столик мікроскопа, наприклад, скляну пластинку з двома взаємно перпендикулярними подряпинками на нижній та верхній поверхнях.

3. За допомогою гвинта грубого фокусування підняти тубус мікроскопа в крайнє верхнє положення. Обертаючи гвинт мікрометричного фокусування, встановити його в нульове положення.

4. Опустити тубус мікроскопа гвинтом грубого фокусування і одержати різке зображення подряпинки на верхній поверхні пластинки.

5. Опускаючи далі тубус мікроскопа гвинтом мікрометричного фокусування, дістати різке зображення подряпини на нижній поверхні пластинки. При цьому підрахувати кількість повних обертів і кількість поділок по шкалі мікрометричного гвинта. Знаючи ціну поділки шкали, розрахувати глибину опускання тубуса мікроскопа, тобто уявну товщину пластинки d' .

6. Мікрометром виміряти дійсну товщину пластинки d в кількох місцях і взяти середнє значення.

7. Згадані вимірювання виконати в білому світлі не менше трьох раз. Для кожного вимірювання підрахувати значення n , а потім знайти середнє значення.

8. Аналогічні вимірювання зробити для пластинки з іншого матеріалу у білому світлі. Порівняти результати, одержані для обох пластинок, і пояснити їх.

9. Повторити всі вимірювання ще 3 рази в монохроматичному світлі, для чого використати світлофільтри.

10. Побудувати графік залежності n від v , відкладаючи v вздовж осі абсцис, а n — вздовж осі ординат.

Контрольні запитання

1. Дайте означення абсолютного і відносного показників заломлення. Який між ними існує зв'язок?
2. Яку швидкість світла можна підрахувати, вимірявши n для певної довжини хвилі?
3. Який параметр електромагнітної хвилі змінюється при проходженні через середовище і чому?
4. Як впливає товщина пластинки на точність вимірювання цим методом показника заломлення?
5. Яке фізичне явище зумовлене залежністю n від v ?

V. Визначення показника заломлення і середньої дисперсії твердих і рідких тіл

Прилади і матеріали: 1) рефрактометр ИРФ-22; 2) набір зразків прозорих твердих тіл; 3) набір пробірок з досліджуваними рідинами; 4) проміжна рідина (машинне масло); 5) ультратермостат.

Теоретичні відомості та опис приладів

Світло в прозорих речовинах залежно від їхніх електричних властивостей поширюється з різною швидкістю. Тому на межі поділу таких середовищ напрям поширення світла змінюється (воно заломлюється). Абсолютний показник заломлення речовини визначається відношенням швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в середовищі:

$$n = c/v. \quad (1)$$

Прилади для вимірювання показника заломлення твердих, рідких і газоподібних речовин називаються *рефрактометрами*. Принцип дії цих приладів ґрунтується на явищі повного внутрішнього відбиття при проходженні світлом межі поділу двох середовищ з різними показниками заломлення. В даній роботі використовується рефрактометр

ИРФ-22, основними частинами якого є дві призми: вимірювальна 1 і освітлювальна 2 (рис. 124). Нижня поверхня AB освітлювальної призми зроблена матовою.

Показники заломлення прозорих рідин визначають в прохідному білому світлі. Досліджувану рідину поміщають між двома паралельними гіпотенузними гранями призми 1 і 2. Паралельний пучок променів, пройшовши освітлювальну призму, попадає на матову поверхню AB і розсіюється. Отже, в досліджувану рідину входять промені різних напрямів. Оскільки показник заломлення досліджуваної рідини n завжди менший, ніж показник заломлення вимірювальної призми n_0 ($n_0 = 1,74$), то промені різних напрямів, заломившись на межі поділу рідини — скло, входять у призму 1.

Для променя SO , який падає під кутом α на вимірювальну призму, можна записати такі співвідношення:

$$\sin \alpha / \sin \beta = n_0 / n, \quad \sin \alpha' = \sin \beta' = 1 / n_0, \quad (2)$$

де β — кут заломлення вимірювальної призми.

При умові $n_0 > n$ кут заломлення завжди обмежений, тобто він не може бути більшим, ніж певний граничний кут заломлення $\beta_{гр}$, якому відповідає кут падіння $\alpha = 90^\circ$ (кут падіння при цьому ковзає по поверхні A_1B_1).

Всі інші промені проходять у вимірювальну призму під кутами, меншими ніж $\beta_{гр}$. Оскільки для променя, який ковзає по поверхні A_1B_1 , $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$, то для граничного кута заломлення матимемо з (2):

$$\sin 90^\circ / \sin \beta_{гр} = n_0 / n \quad \text{або} \quad n = n_0 \sin \beta_{гр}. \quad (3)$$

За формулою (3) можна обчислити n . Проте тут не враховується заломлення променя при його виході з вимірювальної призми. Експериментально не можна заміряти $\beta_{гр}$. В той же час граничному куту $\beta_{гр}$ завжди відповідає граничне значення кута $\beta'_{гр}$, величину якого можна заміряти.

Для $\triangle ODC$ кут DCO зовнішній і дорівнює $\varphi = \beta + \alpha'$. Тоді з виразу (2) можна записати:

$$\sin \beta' = n_0 \sin \alpha' = n_0 \sin (\varphi - \beta) = n_0 \sin \varphi \cdot \cos \beta - n_0 \cos \varphi \cdot \sin \beta. \quad (3a)$$

Так само з виразу (2): $\sin \beta = (n/n_0) \sin \alpha$, а

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - (n^2/n_0^2) \sin^2 \alpha}. \quad (4)$$

Підставивши (4) і (2) в рівняння (3a), дістанемо:

$$\sin \beta' = \sin \varphi \sqrt{n_0^2 - n^2 \sin^2 \alpha} - n \cos \varphi \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$

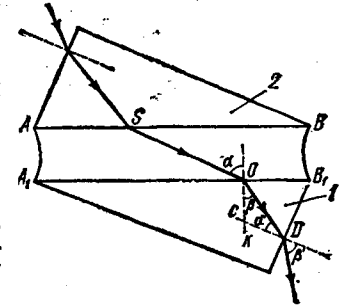


Рис. 1 4

Якщо промінь SO наближається до поверхні A_1B_1 , тобто при $\alpha = 90^\circ$, настає явище повного внутрішнього відбиття. Отже, у вимірну призму ввійдуть лише промені під кутом, не більшим ніж $\beta_{гр}$. При $\alpha = 90^\circ$ формула (5) переписується так:

$$\sin \beta_{гр} = \sin \varphi \sqrt{n_0^2 - n^2} - n \cos \varphi. \quad (6)$$

Оскільки для даної призми n_0 і φ — величини сталі і визначаються незалежно, то при різних n змінюватиметься лише $\beta_{гр}$. Отже, вимірюючи $\beta_{гр}$, можна, таким чином, вимірювати показники заломлення різних речовин. Проте формулу (6) на практиці використовують для градуювання шкали рефрактометрів, а невідомі показники заломлення речовин визначають по градуювальній шкалі.

Припустимо, що для певної рідини призми 1 і 2 розташовані так, що в полі зору спостерігається різке розділення світлого і темного полів, причому межа поділу розташована посередині зорового поля.

Якщо між призмами помістити іншу речовину, то для неї $\beta_{гр}$ буде іншим і межа поділу зміститься з центра поля зору. Щоб межу поділу помістити в центрі поля зору, потрібно повернути призми 1 і 2 на певний кут. За кутом повороту призм градують рефрактометри, а потім по шкалі безпосередньо визначають показник заломлення досліджуван

них рідин. Нагадаємо, що рефрактометрами вимірюються також показники заломлення твердих речовин і газів.

Дисперсія речовини характеризує швидкість зміни коефіцієнта заломлення при зміні довжини світлової хвилі. Якщо двом довжинам хвиль λ_1 і λ_2 відповідають значення коефіцієнтів заломлення n_1 і n_2 , то середня дисперсія в інтервалі довжин хвиль $\lambda_2 - \lambda_1$ визначається співвідношенням

$$\langle \nu \rangle = (n_2 - n_1) / (\lambda_2 - \lambda_1) = \Delta n / \Delta \lambda. \quad (7)$$

Значення дисперсії поблизу даної довжини хвилі визначаються границею відношення (7), тобто

$$\nu = dn/d\lambda. \quad (8)$$

Для обчислення середньої дисперсії встановлено емпіричну формулу

$$\langle \nu \rangle = A + B\sigma, \quad (9)$$

де A і B — сталі коефіцієнти для даного рефрактометра, величину яких знаходять в таблицях, що додаються до приладів; σ — сталий коефіцієнт, який також знаходять в таблицях для добутого значення z , яке відраховують по шкалі барабана приладу.

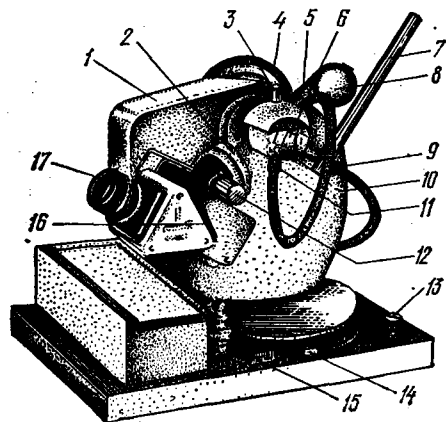


Рис. 125

Рефрактометр ИРФ-22 (рис. 125) складається з таких частин: 1 — корпус; 2 — барабан із шкалою; 3, 5, 9, 11 — шпунтери для термостатування приладу; 4 — гумові трубки; 6 — вимірювальна головка; 7 — термометр; 8 — освітлювальне дзеркало; 10 — кришка вимірювальної головки; 12 — маховик для обертання призм; 13 — діафрагма; 14 — гвинт з чотирикратною головкою для юстування приладу; 15 — спеціальна юстувальна пластинка; 16 — фланець для юстування приладу; 17 — зорова труба.

В ИРФ-22 передбачено термостатування, для чого в оправках призм є спеціальні камери, через які пропускається вода від термостата. Термометром контролюється температура.

Порядок виконання роботи

1. Визначити показник заломлення рідини.

1. Відкинути верхню частину вимірювальної головки 6, на поверхню вимірювальної призми скляною паличкою помістити кілька крапель досліджуваної рідини і закрити головку.

2. Через вікно вимірювальної головки перевірити, чи повністю заповнилася досліджувана рідина зазор між вимірювальною і освітлювальною призмами.

3. Увімкнути термостат, встановивши контактним термометром температуру 20°C . Термометром 7 перевірити температуру з точністю $\pm 1^\circ\text{C}$.

4. Освітлювальним дзеркалом 8 спрямувати світло на освітлювальну призму і добитися рівномірного її освітлення. Закріпити дзеркало гвинтом.

5. Спостерігаючи в окуляр зорової труби 16 і повертаючи вимірювальну головку за допомогою маховика зліва, знайти межу поділу світла і тіні. Обертанням ручки 12 усунути забарвленість.

6. Маховичком зліва приладу сумістити межу поділу світла і тіні з перехрестям сітки і зняти відлік по шкалі показників заломлення. Слід мати на увазі, що шкала показників заломлення побудована для температури 20°C . При інших температурах треба вводити поправки (формули для розрахунку температурної поправки наводяться в заводських інструкціях до приладу).

7. Оцінити похибку вимірювання n .

II. Виміряти показник заломлення твердого тіла.

1. Перевірити, чи відповідає досліджуваний зразок таким вимогам. Зразок повинен бути оптично однорідним і мати дві взаємно перпендикулярні грані. Грань, що торкається вимірювальної призми, мусить бути ідеально плоскою, бокові грані — матовими, товщина зразка не меншою ніж $0,15\text{ мм}$.

2. Відкинути верхню частину вимірювальної головки. Поверхні зразка і вимірювальної призми промити спиртом і протерти чистою ватою. На поліровану поверхню зразка скляною паличкою нанести тонкий шар проміжної рідини (машинного масла).

3. Покласти досліджуваний зразок полірованою гранню на вимірювальну призму. При цьому стежити, щоб проміжна рідина не утворила клин, який значною мірою спотворює результати вимірювань.

Таблиці для визначення середньої дисперсії

n_D	A	Δ	B	Δ	n_D	A	Δ	B	Δ
1,300	0,02437	-6	0,03168	-13	1,510	0,02356	-2	0,02558	-49
1,310	0,02431	-5	0,03155	-14	1,520	0,02354	-1	0,02509	-52
1,320	0,02425	-5	0,03141	-16	1,530	0,02353	-1	0,02457	-54
1,330	0,02420	-5	0,03125	-17	1,540	0,02352	0	0,02403	-57
1,340	0,02415	-5	0,03108	-19	1,550	0,02352	0	0,02346	-59
1,350	0,02410	-5	0,03089	-20	1,560	0,02352	0	0,02287	-62
1,360	0,02405	-4	0,03069	-22	1,570	0,02352	+1	0,02225	-65
1,370	0,02401	-5	0,03047	-24	1,580	0,02353	+1	0,02160	-68
1,380	0,02396	-4	0,03023	-25	1,590	0,02354	+2	0,02092	-71
1,390	0,02392	-4	0,02998	-27	1,600	0,02356	+2	0,02021	-74
1,400	0,02388	-4	0,02971	-29	1,610	0,02358	+3	0,01947	-78
1,410	0,02384	-4	0,02942	-30	1,620	0,02361	+4	0,01869	-83
1,420	0,02380	-4	0,02912	-32	1,630	0,02365	+5	0,01786	-88
1,430	0,02376	-3	0,02880	-34	1,640	0,02370	+6	0,01698	-93
1,440	0,02373	-3	0,02846	-36	1,650	0,02376	+7	0,01605	-99
1,450	0,02370	-3	0,02810	-37	1,660	0,02383	+8	0,01506	-106
1,460	0,02367	-3	0,02773	-39	1,670	0,02391	+9	0,01400	-116
1,470	0,02364	-2	0,02734	-41	1,680	0,02400	+11	0,01286	-124
1,480	0,02362	-3	0,02693	-43	1,690	0,02411	+14	0,01162	-137
1,490	0,02359	-2	0,02650	-45	1,700	0,02425		0,01025	
1,500	0,02357	-1	0,02605	-47					

z	σ	Δ	z	z	σ	Δ	z
0	1,000	-1	60	16	0,669	-40	44
1	0,999	-4	59	17	0,629	-41	43
2	0,995	-7	58	18	0,588	-43	42
3	0,988	-10	57	19	0,545	-45	41

Продовження таблиці

z	σ	Δ	z	z	σ	Δ	z
4	0,978	-12	56	20	0,500	-46	40
5	0,966	-15	55	21	0,454	-47	39
6	0,951	-17	54	22	0,407	-49	38
7	0,934	-20	53	23	0,358	-49	37
8	0,914	-23	52	24	0,309	-50	36
9	0,891	-25	51	25	0,259	-51	35
10	0,866	-27	50	26	0,208	-52	34
11	0,839	-30	49	27	0,156	-52	33
12	0,809	-32	48	28	0,104	-52	32
13	0,777	-34	47	29	0,052	-52	31
14	0,743	-36	46	30	0,000		30
15	0,707	-38	45				

При хорошій установці зразка немає забарвленості поверхні дотику зразка і призми.

4. Провести вимірювання показника заломлення так само, як це робиться для рідини.

5. Повторити досліди кілька разів. Знайти середнє значення. Зробити висновки.

6. Шуканий показник заломлення твердого тіла обчислити за формулою $n = n' \cdot b$, де n' — показник заломлення, знятий по шкалі приладу, b — сталий коефіцієнт (для машинного масла $b = 1,02$).

III. Визначити середню дисперсію речовини.

1. Зразок установити так само, як і для вимірювання показника заломлення (завдання I, II).

2. Обертанням ручки 12 повернути призму компенсатора до повного усунення забарвленості межі поділу. Відрахунок проводити по барабану 2, поділеному на 120 частин (від 0 до 60 поділок за годинниковою стрілкою і проти неї). Якщо усунути забарвленість, але обертати маховик далі у той же бік до протилежного, але рівного значення відрахунку, то межа поділу вдруге виявиться безбарвною. Проти штриха зняти значення z .

3. При вимірюваннях провести не менше п'яти відрахунків з обох боків барабана і знайти середнє арифметичне z .

4. Для вимірюного значення показника заломлення n досліджуваної речовини за таблицею на с. 180 знайти константи A і B .

5. Для вимірюваного значення z знайти за таблицями величину σ . Слід врахувати, що для z , більших за 30, σ набуває від'ємних значень.
6. За визначеними A , B і σ розрахувати величину середньої дисперсії за формулою (9).
7. Проробити досліди для рідини і твердого тіла.

Контрольні запитання

1. Яка будова рефрактометрів і принцип дії їх?
2. Вивести формулу для обчислення n за відомим граничним кутом.
3. Що буде видно в зоровій трубці рефрактометра, якщо умова $n_0 > n$ не виконується?
4. З яких міркувань слід обирати вимірювальну призму і іммерсійну рідину?
5. Які ще методи вимірювання показників заломлення ви знаєте?

VI. Дослідження абераций лінз

Прилади і матеріали: 1) оптична лава; 2) освітлювач із сіткою; 3) коліматорна лінза; 4) досліджувана лінза; 5) набір світлофільтрів; 6) набір картонних діафрагм з круговими отворами в центрі і кільцевими по краях; 7) сітка з відстанню між штрихами 1 см; 8) екран.

Теоретичні відомості та опис приладів

Ідеальна оптична система повинна задовольняти три умови Максвелла:

- 1) гомоцентричний пучок променів залишається гомоцентричним після проходження через ідеальну оптичну систему;
 - 2) зображення плоских фігур в ідеальній оптичній системі підлягає закону подібності (відповідність форми предмета);
 - 3) якщо площина предметів перпендикулярна до головної оптичної осі, то і площина зображень залишається перпендикулярною до неї.
- Реальні оптичні системи відповідають законам ідеальних оптичних систем лише для параксіальних пучків променів.

Використання на практиці параксіальних пучків променів приводить до послаблення освітленості зображень і до скорочення розмірів зображуваних предметів. Тому в більшості випадків освітлення проводять широким пучком променів, але при цьому виникає ряд спотворень зображень, які називають аберациями. Аберациям також пов'язані з дисперсією світла при його проходженні через оптичну систему.

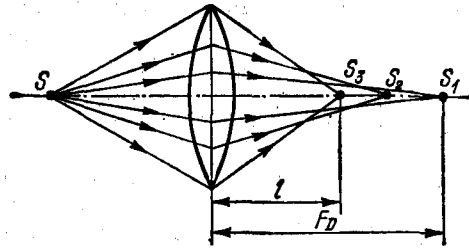


Рис. 126

Якщо від точкового джерела світла S , розташованого на головній оптичній осі, попадає на лінзу широкий пучок світла, то параксіальний пучок дає зображення точкового джерела в точці S_1 , а більш віддалені промені — зображення світної точки в S_2 , S_3 і т. д. (рис. 126).

При достатній ширині пучка монохроматичних променів стигматичності зображення не буде. Цей тип абераций називають *сферичною абе-*

рацією. Оскільки сферична аберация відрховується вздовж оптичної осі, то вона дістала назву *поздовжньої сферичної аберации*. Мірою поздовжньої сферичної аберации ΔS є різниця відстаней від центра лінзи до зображення для широких і параксіальних променів, тобто

$$\Delta S = l - F_D, \quad (1)$$

де F_D — фокусна відстань лінзи для жовтої лінії натрію ($\lambda_D = 586$ нм); l — відстань від центра лінзи до точки, в якій визначається сферична аберация.

Для збиральних лінз поздовжня сферична аберация від'ємна, для розсіювальних — додатна. Тому, комбінуючи розсіювальні і збиральні лінзи, можна виправляти сферичну аберацию.

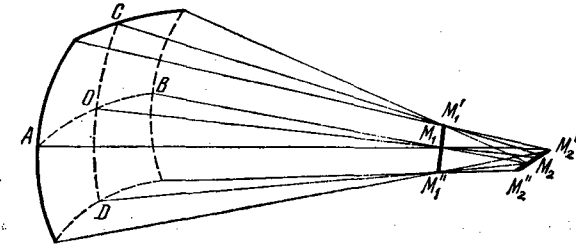


Рис. 127

Втрата гомоцентричності пучка променів унаслідок скісного падіння їх на лінзу або неоднаковості кривизни поверхонь лінзи в довільних двох перерізах називається *астигматизмом*. Сферична поверхня фронту гомоцентричного пучка променів, що попадає на лінзу, при виході з неї внаслідок астигматизму стає поверхнею двоякої кривизни. Інакше кажучи, заломлений у лінзі пучок світлових променів стає астигматичним пучком, що має двояку кривизну, завдяки чому поверхні зображення вертикальних і горизонтальних ліній предмета виявляються розділеними в просторі. На рис. 127 зображено астигматичний пучок променів.

Промені вертикальних меридіональних поверхонь астигматичного пучка перетнуться по лінії $M_1'M_1'$, а промені горизонтальних сагітальних поверхонь перетнуться по лінії $M_2'M_2'$. Відповідно радіусом кривизни меридіональної поверхні буде відстань $OM_1 = l_1$, а сагітальної — $OM_2 = l_2$. Величину $\Delta l = l_2 - l_1$ називають *астигматичною різницею*.

Причиною астигматизму можуть бути також асиметрія оптичної системи, невідцентрованість її, наявність дефектів у лінзах.

Дослідно астигматичну різницю визначають із спостережень зображення вертикальних і горизонтальних ліній сітки при різних кутах повороту лінзи.

Аберация оптичних систем поділяються на монохроматичні (спотворення зображень, що утворюються променями однієї частоти) і хроматичні (зумовлені дисперсією променів різної частоти). *Монохроматичними* є: сферична аберация (поздовжня і поперечна), кома, астигматизм, дисторсія, кривизна поля; *хроматичними* — поздовжня хроматична аберация і хроматична різниця збільшень.

Хроматична аберация зумовлена залежністю показника заломлення оптичних середовищ від довжини світлової хвилі.

Фокусна відстань лінзи залежить від її показника заломлення і від радіусів кривизни сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, за формулою

$$F = \frac{1}{(n-1)(1/R_1 - 1/R_2)} \quad (2)$$

Оскільки $n = f(\lambda)$, то і $F = f(\lambda)$. Тому навіть параксіальний монохроматичний пучок променів після заломлення в лінзі матиме цілий ряд фокусів уздовж головної оптичної осі, кожний з яких відповідатиме певній довжині хвилі. Тому на практиці визначають фокусну відстань оптичних систем для певної довжини хвилі, найчастіше для жовтої лінії натрію λ_D .

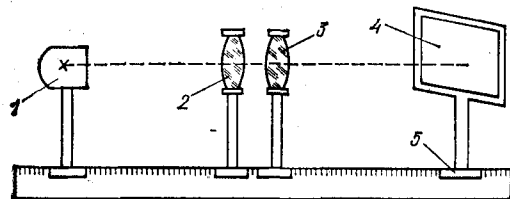


Рис. 128

Поздовжня хроматична аберация лінз визначається різницею фокусних відстаней для досліджуваної довжини хвилі F_λ і для жовтої лінії натрію F_D :

$$\Delta = F_\lambda - F_D \quad (3)$$

Експериментально деякі з абераций лінз можна дослідити за допомогою оптичної лави, на якій закріплено освітлювач з сіткою 1, коліматорну 2 і досліджувану 3 лінзи і екран 4. Всі ці прилади за допомогою штативів і гвинтів встановлюються в рейтерах 5 (рис. 128). Рейтери мають покажчики для фіксації їх положень на шкалі оптичної лави. Довжина оптичної лави має бути не меншою ніж 1 м, а ціна поділки її шкали не повинна перевищувати 1 мм. Рейтер з досліджуваною лінзою має лімб для відрахунку кута повороту лінзи. В оправу досліджуваної лінзи можуть бути встановлені картонні діафрагми з отворами і кільцями різних діаметрів. Коліматорна лінза довгофокусна. Освітлювач з сіткою має оправу для встановлення світлофільтрів.

Порядок виконання роботи

I. Дослідити поздовжню сферичну аберацию.

1. Встановити освітлювач з сіткою, досліджувану і коліматорну лінзи, а також екран на оптичній лаві. Відцентрувати систему вздовж головної оптичної осі досліджуваної лінзи.

2. Пересуваючи коліматорну лінзу вздовж оптичної лави, встановити її так, щоб сітка освітлювача знаходилась у її фокусі. Досліджувану лінзу встановити поряд з коліматорною.

3. Встановити в оправу досліджуваної лінзи діафрагму з найменшим отвором (виділити параксіальний пучок променів) і, пересуваючи екран, знайти різке зображення сітки. Виміряти відстань від лінзи до екрана. Це і буде фокусна відстань F_D .

4. Вставляючи в оправу кільцеві діафрагми з різним віддаленням кілець від осі, також знайти різке зображення сітки на екрані і шоразу

заміряти відстань між екраном і досліджуваною лінзою. Це будуть відстані від лінзи до аберацийних зображень сітки l_1, l_2 і т. д.

5. Для кожної кільцевої діафрагми розрахувати поздовжню сферичну аберацию за формулою (1). Врахувати знак ΔS .

6. Побудувати графіки залежності ΔS і l від діаметрів діафрагм та проаналізувати їх.

II. Дослідити астигматизм лінзи.

1. Встановити в освітлювач з сіткою жовтий світлофільтр ($\lambda = 586$ нм) (астигматизм вивчають в монохроматичному світлі) і повернути досліджувану лінзу на кут $\varphi = 10^\circ$.

2. Пересуваючи екран уздовж оптичної лави, знайти найбільше різке зображення вертикальних ліній сітки, а потім горизонтальних. Зафіксувати в обох випадках положення екрана по шкалі оптичної лави. Різниця цих положень дасть величину астигматичної різниці Δl .

3. Повторити досліди, послідовно повертаючи досліджувану лінзу на наступні 10° .

4. Побудувати графік залежності Δl від кута повороту лінзи φ .

III. Дослідити поздовжню хроматичну аберацию.

1. В оправу досліджуваної лінзи встановити діафрагму і виділити параксіальний пучок променів.

2. Встановити жовтий світлофільтр в освітлювач і, переміщуючи екран, знайти різке зображення сітки. Відстань між лінзою і екраном визначає фокусну відстань лінзи.

3. Міняючи світлофільтри, повторити досліди і визначити для кожного з них F_λ .

4. За формулою (3) для кожної довжини хвилі обчислити поздовжню хроматичну аберацию, враховуючи її знак.

5. Побудувати графік залежності $\Delta F(\lambda)$ і проаналізувати його.

Контрольні запитання

1. Які оптичні системи називаються ідеальними?
2. Які причини виникнення спотворень зображень в лінзах?
3. Які ви знаєте основні поняття геометричної оптики? Дайте їх означення.
4. Назвіть види абераций лінз. Поясніть їх причини.
5. Які основні характеристики тих абераций, дослідження яких ви провели?

22. Вивчення теплового випромінювання

[23, 24, 28, заводські інструкції]

Виходячи з уявлень про дискретний характер випускання енергії мікроскопічним осцилятором, М. Планк встановив єдиний закон розподілу енергії по довжинах хвиль в усій області спектра теплового випромінювання. Формула Планка має вигляд

$$\epsilon_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (6)$$

Інтегрування цієї функції при $T = \text{const}$ в інтервалі довжин хвиль від $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$ дає вираз для енергетичної світності абсолютно чор-

ного тіла E_T , або закон Стефана — Больцмана:

$$E_T = \int_0^\infty \epsilon_{\lambda,T} d\lambda = \sigma T^4, \quad (в)$$

де σ — стала Стефана — Больцмана.

Довжина хвилі, при якій функція $\epsilon_{\lambda,T}$ досягає максимального значення, визначається законом зміщення Віна:

$$\lambda_{\max} T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}. \quad (г)$$

Спектральна випромінювальна здатність будь-якого нечорного тіла дорівнює:

$$\epsilon_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \epsilon_{\lambda,T}. \quad (д)$$

Величину $a_{\lambda,T}$ називають *ступенем чорноти*. Вона визначається відношенням енергії випромінювання даного тіла до енергії випромінювання абсолютно чорного тіла при тій самій температурі.

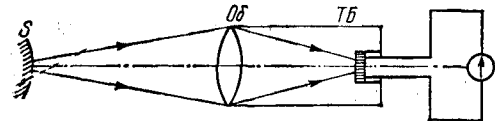


Рис. 129

На основі (в) з урахуванням (д) для енергетичної світності нечорного тіла знаходимо:

$$E_T = a_T \sigma T^4. \quad (е)$$

Якщо випускання випромінювання відбувається в середовищі з температурою T_0 , то (е) матиме вигляд

$$E_T = a_T \sigma (T^4 - T_0^4). \quad (ж)$$

Для сірого тіла

$$\epsilon_{\lambda_1,T} / \epsilon_{\lambda_2,T} = (\epsilon_{\lambda_1,T} / \epsilon_{\lambda_2,T})_c.$$

Методи визначення температури розжарення тіл, засновані на законах теплового випромінювання, носять назву методів *оптичної пірометрії*. Прилади, які застосовуються в оптичній пірометрії, називають *пірометрами випромінювання*. Вони бувають двох видів: радіаційні та оптичні (із зникаючою ниткою). *Радіаційний пірометр* дає змогу виміряти температуру за інтегральним випромінюванням тіла з використанням виразів (в) або (е). Схему приладу подано на рис. 129. Лінза об'єктива створює зображення ділянки розжареної поверхні S у місці розташування термобатареї $ТБ$. Термострум вимірюється гальванометром. Якщо розміри зображення джерела випромінювання більші за розміри поверхні термобатареї і якщо можна знехтувати втратами тепла у термобатареї, то покази гальванометра пропорційні потужності випромінювання тіла. Для абсолютно чорного тіла покази гальванометра пропорційні четвертому степеню температури. Проградувавши пірометр за відомими температурами, його можна використовувати для вимірювання температури різних тіл. Але якщо досліджуване тіло не є абсолютно чорним, то пірометр покаже не істинну температуру, а так звану *радіаційну температуру* T_p . Радіаційна температура довільного нечорного тіла дорівнює температурі абсолютно чорного тіла, яке

випускає таку ж потужність випромінювання, що й досліджуване. Порівнюючи вирази (в) і (е), дістанемо:

$$T = (1/\sqrt[4]{a_T}) T_p. \quad (з)$$

Істинну температуру тіла можна обчислити, якщо відома величина

$$a_T = \int_0^\infty a_{\lambda,T} d\lambda,$$

тобто середнє значення поглинальної здатності розглядуваного нечорного тіла.

Досить поширеними, особливо у промислових вимірюваннях, є *пірометри із зникаючою ниткою*. Визначення температури за допомогою цих пірометрів базується на безпосередньому порівнянні яскравості випромінювання тіла в певній області спектра з яскравістю еталонного джерела в тій самій області. Еталонне джерело світла попередньо градується за випромінюванням абсолютно чорного тіла. Температура, визначена таким способом, називається *яскравісною температурою* T_j . Яскравісна температура довільного нечорного тіла — це така, яку воно мало б, випромінюючи у даній спектральній області як абсолютно чорне тіло. Яскравісна температура тіла для різних ділянок спектра різна:

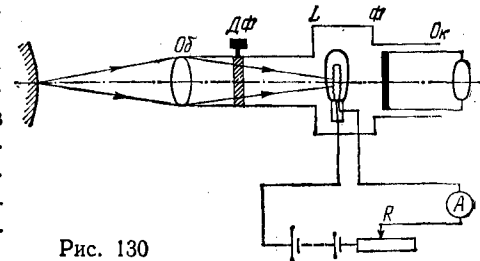


Рис. 130

Якщо досліджуване джерело — також нитка розжарення, то спостерігають за місцем їхнього перетину. При недостатньому розжаренні лампи у приладі місце їхнього перетину буде темним, при надмірному — світлим. Покази по шкалі температури знімають, коли яскравості обох джерел однакові. При вимірюванні температури понад 1400°C вводять світлофільтр $ДФ$. При цьому позірня яскравість досліджуваного джерела буде меншою, тому для вимірювання яскравостей потрібний менший струм розжарення еталонної лампи. Відповідно прилад має другу (нижню) шкалу для високих температур.

$$T = \frac{T_j}{1 + (k\lambda/hc) \ln a_{\lambda,T_j}}. \quad (и)$$

Схему пірометра із зникаючою ниткою подано на рис. 130. У фокальній площині об'єктива знаходиться нитка розжарення еталонної лампи L , розжарення якої регулюється реостатом R . За допомогою тубуса окуляра суміщують нитку еталонної лампи із зображенням випромінюючої поверхні. За допомогою реостата розжарення нитки лампи змінюють так, щоб на фоні випромінюючої поверхні нитка зникла. Якщо досліджуване джерело — також нитка розжарення, то спостерігають за місцем їхнього перетину. При недостатньому розжаренні лампи у приладі місце їхнього перетину буде темним, при надмірному — світлим. Покази по шкалі температури знімають, коли яскравості обох джерел однакові. При вимірюванні температури понад 1400°C вводять світлофільтр $ДФ$. При цьому позірня яскравість досліджуваного джерела буде меншою, тому для вимірювання яскравостей потрібний менший струм розжарення еталонної лампи. Відповідно прилад має другу (нижню) шкалу для високих температур.

1. Як і чи перевірка закону Кірхгофа

Прилади і матеріали: 1) електрична лампа на 60 Вт, 250 В; 2) регулятор напруги РНШ-250; 3) амперметр Э513; 4) вольтметр Э515; 5) пірометр ОПШР-017.

Закон Кірхгофа (а) точно виконується для спектральних та інтегральних величин. Він встановлює зв'язок між здатністю тіла випускати енергію та поглинати її у вигляді випромінювання. Всяке тіло може випускати випромінювання лише у тих областях спектра, в яких воно має відмінну від нуля поглинальну здатність. Кількість енергії, яка випускається тілом при температурі T , чисельно дорівнює кількості енергії, яку воно поглинуло б при опроміненні його випромінюванням абсолютно чорного тіла з тією ж самою температурою T : $E_T/E_{чТ} = A_T$.

Оскільки для нечорних тіл $A_T < 1$, то

$$E_T/E_{чТ} < 1. \quad (1)$$

Якщо вважати, що в нитці розжарення вся електрична енергія перетворюється на енергію випромінювання, то можна записати:

$$E_T = \Phi/S = IU/S, \quad (2)$$

де S — ефективна випромінююча поверхня нитки; I , U — сила струму лампи і напруга на ній при даній температурі розжарення. Тоді (2) з урахуванням (е) і (1) матиме вигляд

$$E_T/E_{чТ} = IU/(S\sigma T^4) < 1. \quad (3)$$

Для ниток складної форми (спіралей) ефективна випромінююча поверхня менша за геометричну, оскільки окремі витки обмінюються випромінюванням один з одним. Її значення задається окремо для лампи відповідної потужності.

Виконання завдання I зводиться до перевірки нерівності (3).

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло з вольфрамовою лампою розжарювання, включивши в нього амперметр та вольтметр.
2. Підімкнути до джерела напруги пірометр та перевірити його роботу, змінюючи струм опором через еталонну лампу.
3. Направити об'єктив пірометра на розжарену нитку вольфрамової лампи. Зміщуючи тубус окуляра, домогтися різкого зображення нитки.
4. Обертаючи кільце реостата пірометра, зрівняти яскравості нитки досліджуваної лампи та еталонної. Записати значення температури.
5. Напругу змінювати через кожні 20 В від 80 до 200 В. Для кожного значення напруги виміряти температуру.
6. Побудувати графік залежності $E_T/E_{чТ} = f(T)$ та пояснити його.

Контрольні запитання

1. Що називають тепловим випромінюванням і яка його відмінність від інших видів випромінювання?
2. Що таке сіре тіло і чим пояснити таку назву?
3. В якому діапазоні довжин хвиль випускає випромінювання поверхня тіла людини?
4. Що таке оптична пірометрія?

II Якісна перевірка закону зміщення Віна

Прилади і матеріали: 1) електрична лампа розжарювання; 2) оптичний пірометр ОППІР-017; 3) фотоеlement ФЭСС-У2; 4) світлофільтри КС-13, СС-1; 5) мікроамперметр М109/1.

Формула Планка для випромінювання абсолютно чорного тіла дає змогу побудувати ряд ізотерм. Кожна ізотерма характеризує розподіл енергії у спектрі випромінювання. Завдяки їй можна оцінити енергію, що припадає на різні ділянки спектра. Довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної випускної здатності, визначається законом зміщення Віна (τ). Його аналіз показує, що при підвищенні температури максимум спектральної випромінювальної здатності переміщується у сторону коротких довжин хвиль. Тому відношення випромінювальної здатності розжареного тіла у синій та червоній ділянках видимого спектра повинно зростати з підвищенням температури:

$$(E_T)_{\lambda}(E_T)_{\tau} = f(T). \quad (1)$$

Якщо експериментально виміряти потоки випромінювання у двох ділянках спектра, то функція $f(T)$ повинна зростати із зростанням температури. Світловий потік можна оцінити за допомогою фотоеlementa, струм у колі якого пропорційний спектральній випромінювальній здатності розжареного тіла в певних областях спектра. Тому відношення фотострумів буде такою ж зростаючою функцією температури, як і для спектральних випромінювальних здатностей (1):

$$I_{\epsilon}(T)/I_{\tau}(T) = f(T). \quad (2)$$

Схема установки дається на рис. 131.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути електричну лампу розжарювання в освітлювальну мережу через регулятор напруги РНШ-250.
2. Подати на лампу напругу 100 В, оптичним пірометром виміряти температуру.
3. На шляху потоку від досліджуваної лампи розташувати червоний світлофільтр КС-13.
4. Змінюючи напругу на лампі через кожні 20 В, виміряти температуру нитки та зафіксувати покази мікроамперметра у колі фотоеlementa.
5. Зробити аналогічні вимірювання для світлофільтра СС-1 та побудувати графік за рівнянням (2).

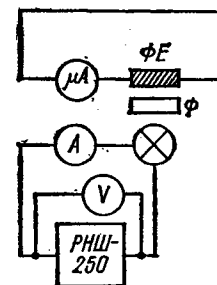


Рис. 131

Контрольні запитання

1. Як дістати математичний запис закону зміщення Віна з формули Планка?
2. Яку температуру має нагріте тіло, якщо більша частина його випромінювання лежить в ультрафіолетовій ділянці спектра?
3. Для яких тіл радіаційна температура дорівнює яскравісній?

III. Визначення сталої Стефана — Больцмана

Прилади і матеріали: 1) трансформатор знижувальний 120/6; 2) вольтамперметр Д-128; 3) пірометр ОПНІР-017; 4) нікелева (ніхромова) смужка у керамічних затискачах; 5) вольтметр Э515; 6) регулятор напруги РНШ-250.

Теоретичні відомості та опис приладів

Стала Стефана — Больцмана належить до групи фундаментальних фізичних констант. У даній роботі для визначення сталої Стефана — Больцмана застосовується метод порівняння потужності електричного струму, що витрачається на розжарення нікелевої смужки, та потужності випромінювання з її повної поверхні. Світіння нікелю, який при розжаренні вкривається окалиною, наближається до світіння абсолютно чорного тіла. Оскільки для нікелю поглинальна здатність менша за одиницю, стала в досить широкому діапазоні довжин хвиль і залежить лише від стану поверхні, то його енергетична світність визначається формулою (ж). Якщо знехтувати втратами на теплопровідність провідників, керамічних затискачів, середовища, що оточує розжарену смужку, можна записати таку рівність:

$$IU = a_T S \sigma (T^4 - T_0^4).$$

Звідси

$$\sigma = IU / (a_T S (T^4 - T_0^4)), \quad (1)$$

де $S = 2(a + b)l$ — повна площа розжареної смужки; a — ширина; b — товщина; l — відстань між затискачами; $a_T = 0,48$ для окисленого нікелю при 600°C ($a_T = 0,75$ при 1000°C); T_0 — температура навколишнього середовища.

Для вимірювання температури в даному завданні використовується пірометр із зникаючою ниткою.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку за схемою рис. 132. Підімкнути батарею акумуляторів до пірометра.
2. Поступово збільшуючи регулятором РНШ-250 напругу у первинній обмотці трансформатора, домогтися розжарення смужки до температури $700\text{--}800^\circ\text{C}$ (темно-червоний колір).

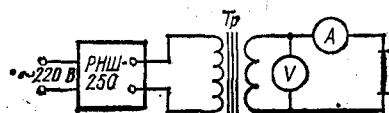


Рис. 132

3. Навести об'єктив пірометра на розжарену смужку та домогтися різкого її зображення. Увімкнути струм розжарення пірометричної лампи. Зміщуючи окуляр, дістати різке зображення нитки.

4. Сумістити зображення нитки лампи із зображенням розжареної смужки і змінюючи реостатом струм у колі пірометричної лампи, домогтися вирівнювання їхніх яскравостей. Зафіксувати покази по шкалі пірометра та значення напруги на затискачах нікелевої смужки і струму в ній.

5. Під керівництвом викладача збільшити струм розжарення нікелевої смужки до 40 А , зробивши при цьому 2—3 вимірювання температури. При цьому слід пам'ятати, що при вимірюванні температури понад 1400°C поворотом головки на тубусі пірометра вводять в систему спеціальний світлофільтр і покази знімають по другій шкалі.

6. Користуючись номограмою (рис. 133), знайти істинну температуру розжареної смужки за її яскравісною температурою і ступенем чорноти при $\lambda = 650\text{ нм}$. За формулою (1) обчислити значення сталої σ .

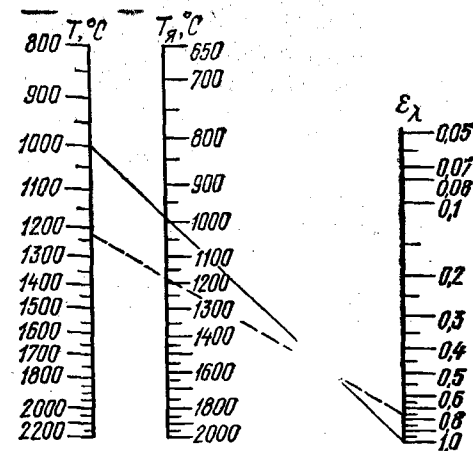


Рис. 133

Контрольні запитання

1. Як дістати вираз закону Стефана — Больцмана з формули Планка?
2. Яку температуру вимірюють оптичними методами?
3. Навіщо в пірометрі встановлено світлофільтр?

IV. Визначення випромінювальної здатності вольфраму

Прилади і матеріали: 1) електрична лампа розжарювання; 2) вольтметр Э515; 3) амперметр Э513; 4) регулятор напруги РНШ-250.

Теоретичні відомості та опис приладів

Вивчення теплового випромінювання довільного розжареного тіла зручно виконувати, користуючись основними характеристиками випромінювання абсолютно чорного тіла. Вираз для випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла дається законом Стефана — Больцмана

$$E_T = \sigma T^4,$$

де σ — стала Стефана — Больцмана. Численні дослідження дали підставу поширити цю залежність і на випадок нечорних тіл. З цією метою останній формулі надавали такого вигляду:

$$E_T = B(T) T^{n(T)}, \quad (1)$$

де $B(T)$ і $n(T)$ — величини, характерні для кожного конкретного тіла, які є функціями температури тіла та стану поверхні. У достатньо вузькому інтервалі температур величини B і n можна вважати сталими.

Тоді завдання знаходження E_T потребує методів визначення сталих і n . Це можна зробити за допомогою електричних вимірювань.

Застосуємо до теплового випромінювання довільного розжареного тіла закон збереження енергії, записавши його в такому вигляді: у

$$I^2 R = \alpha (T - T_0) + B (T^n - T_0^n), \quad (2)$$

де α — коефіцієнт теплообміну.

Ліва частина виразу (2) — це повна енергія, одержана тілом при його розжаренні електричним струмом за одиницю часу. Перший доданок правої частини виражає енергію, втрачену тілом за рахунок теплообміну (закон Ньютона). Другий доданок — втрата енергії за

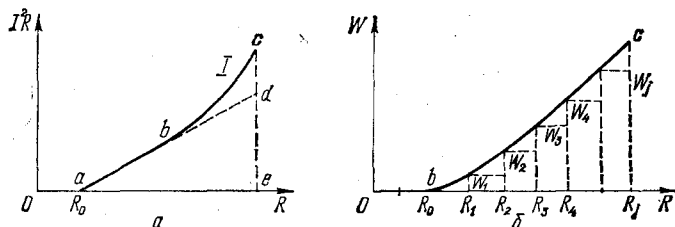


Рис. 134

рахунок випускання випромінювання. Відомо, що опір провідника у досить великому інтервалі температур лінійно залежить від температури. Тому у рівнянні (2) можна перейти від змінної T до змінної R :

$$I^2 R = C' (R - R_0) + B' (R^n - R_0^n), \quad (3)$$

де C' , B' — нові константи.

Графік рівняння (3) наведено на рис. 134, а. При низьких температурах переважають втрати енергії через теплопровідність (перший доданок у (3)). Цьому інтервалу температур відповідає ділянка ab графіка. Для високих температур вирішальними є втрати за рахунок випускання випромінювання. Внаслідок нелінійної залежності їх від температури крива I від прямолінійної ділянки переходить у ділянку bc . Якщо від точки b продовжити прямолінійну ділянку кривої I до перетину з ce та відняти від ce відрізок de , можна виключити втрати, пов'язані з теплопровідністю:

$$I^2 R - C' (R - R_0) = B' (R^n - R_0^n) \quad \text{або} \quad (4)$$

$$W = B' R^n - B' R_0^n. \quad (5)$$

Покладемо $B' R_0^n = \text{const} = f$. Тоді

$$W = B' R^n - f. \quad (6)$$

Побудувавши графік залежності (6), можна знайти показник степеня n . Для цього оберемо деякий масштаб для R та відкладемо на осі абсцис відрізки R_1 , $R_2 = mR_1$, $R_3 = m^2 R_1$, ..., $R_j = m^{j-1} R_1$ (рис. 134, б). Знаменник прогресії m та R вибираємо таким чином, щоб використати достатньо вузький інтервал температур 200—400°, в якому повинно

бути не менше 5 точок. Запишемо значення W для кожної точки. З формули (6) маємо:

$$W_1 = B' R_1^n - f,$$

$$W_2 + W_1 = B' (mR_1)^n - f,$$

$$W_3 + W_2 + W_1 = B' (m^2 R_1)^n - f,$$

Віднімемо від кожного наступного рівняння попереднє. Дістанемо:

$$W_j = B' (m^j R_1)^n - B' (m^{j-1} R_1)^n,$$

де j — номер відрізка. Останній вираз запишемо у вигляді

$$W_j = B' (m^n - 1) R_j^n. \quad (7)$$

Логарифмуючи цей вираз, дістанемо:

$$\log W_j = n \log R_j + \log [B' (m^n - 1)]. \quad (8)$$

Другий доданок є величиною сталою для всіх j . Побудуємо графік залежності $\log R_j$ від $\log W_j$. За нахилом цієї кривої визначимо показник степеня n . Для обчислення B' спростимо вираз (7), оскільки практично $m \gg 1$. Тоді матимемо: $B' = W_j / R_j m^n$. Оскільки $B' (R^n - R_0^n) = B (T^n - T_0^n)$, то

$$B = B' (R^n - R_0^n) / (T^n - T_0^n). \quad (9)$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку.
2. Змінюючи регулятором РНШ-250 напругу на електричній лампі, виміряти 5 значень I і U в інтервалі температур 600—800 °С.
3. За формулою $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$ обчислити значення R для п'яти температур. (Для вольфраму $\alpha = 5,1 \cdot 10^{-3}$ К, значення R_0 дається керівником занять в залежності від потужності лампи.)
4. Побудувати графік залежності (8) та обчислити значення n .
5. Зробити вимірювання за пп. 2, 3 для інтервалу 1300—1500 °С та визначити n для цього інтервалу температур.
6. За формулою (9) обчислити сталу B для максимальних значень температур обох інтервалів.
7. Обчислити випромінювальну здатність вольфраму за формулою (1) та порівняти це значення з аналогічним для абсолютно чорного тіла при температурі 1500 °С.

Контрольні запитання

1. Що таке випромінювальна і що таке поглинальна здатності нагрітого тіла?
2. Якими законами описується випромінювання абсолютно чорного тіла?
3. Чим відрізняються випромінювальна та поглинальна здатності нечорного тіла від випромінювальної та поглинальної здатностей абсолютно чорного тіла?
4. Як працює яскравісний пірометр із зникаючою ниткою?

23. Вивчення законів зовнішнього фотоелефекту [22, 23, 25]

Суть явища зовнішнього фотоелефекту полягає у випусканні електронів речовиною під дією світла.

Закони фотоелефекту пояснив А. Ейнштейн на основі квантової теорії світла. Користуючись законом збереження енергії, Ейнштейн вивів рівняння

$$h\nu = A + mv^2/2, \quad (a)$$

де $h\nu$ — енергія падаючого кванта світла; A — робота виходу електрона з металу; v — швидкість фотоелектронів; m — маса електрона.

На рис. 135 наведено типову залежність сили фотоструму I від напруги U . Існування фотоструму при значеннях $U < 0$ свідчить про

відмінну від нуля початкову кінетичну енергію фотоелектронів. Максимальна початкова швидкість v_{\max} пов'язана з величиною затримуючого потенціалу U_s співвідношенням

$$eU_s = mv_{\max}^2/2, \quad (b)$$

де e і m — заряд і маса електрона. Максимальне значення струму I_n називається фотострумом насичення; він зумовлений тим, що всі фотоелектрони досягають анода.

Зовнішній фотоелефект практично безінерційний. Він має широке застосування в науці і техніці для безпосереднього перетворення енергії світла на енергію електричного струму, для вимірювання і реєстрації світлових потоків.

Прилади, дія яких ґрунтується на використанні фотоелефекту, називаються *фотоелементами*.

Фотоелементи можуть бути вакуумні або газонаповнені. *Вакуумний* фотоелемент складається із скляного балона, всередині якого розміщені фотокатод і колектор електронів або анод. *Фотокатод* являє собою тонкі шари сурми і цезію, нанесені на внутрішню поверхню скляного балона. Матеріал фотокатода вибирається залежно від області застосування фотоелемента. Так, сурм'яно-цезієві фотокатооди чутливі до ультрафіолетової та короткохвильової частин видимого світла, а киснево-цезієвої — до інфрачервоної частини спектра. Металевий *анод* фотоелемента має форму сфери і розташований у центральній частині скляного балона. Електричні контакти вмонтовані у цоколь фотоелемента. Вакуумні фотоелементи широко застосовуються у звуковій апаратурі (ЦВ-3, СЦВ-3); фотометрах (Ф-2, Ф-3), спектрометрах (Ф-3), у схемах автоматичного контролю тощо.

Використання *газонаповнених* фотоелементів обмежене їх інерційністю, невисокою часовою стабільністю, відсутністю насичення анодних характеристик і т. п.

Якщо поверхню металу у вакуумі бомбардувати швидкими електронами, то ці електрони викликають емісію нових електронів з цієї ж поверхні, тобто спостерігається явище вторинної електронної емісії. Число вторинних електронів може бути в кілька разів більшим за число первинних електронів. Це явище лежить в основі роботи фотоелект-

Основні характеристики фотоелементів і фотопомножувачів

Тип приладу	Фотокатод		Число діодів	Область чутливості, нм	Напруга, В	Темновий струм, А
	Матеріал наповнення	Інтегральна чутливість, мкА/лм				
ЦВ-1	AgO · Cs вакуумний	20	—	400—1200	240	$1 \cdot 10^{-7}$
ЦГ-1	AgO · Cs газонаповнений	75	—	400—1200	240	»
СЦВ-3	SbCs вакуумний	80—140	—	400—600	240	$1 \cdot 10^{-8}$
Ф-1	SbCs вакуумний	70—130	—	215—600	80—100	$1 \cdot 10^{-14}$
ФЭУ-11	Sb · Cs	30	12	450—600	650—1150	$8 \cdot 10^{-7}$
ФЭУ-19	»	35	13	400—600	900—2000	$4 \cdot 10^{-7}$
ФЭУ-25	»	35	9	400—600	1000—1700	$5 \cdot 10^{-8}$
ФЭУ-38	SbKNaCs	90	13	400—700	1000—2000	$1 \cdot 10^{-7}$
ФЭУ-39	Sb · Cs з кварцовим вікном	25	11	300—600	1200—1700	$6 \cdot 10^{-9}$

ричних помножувачів, які застосовуються у різних галузях науки і техніки: в ядерній фізиці як сцинтиляційні лічильники, у спектрометрії, для підсилення слабких іонних струмів в масспектрометрії та ін.

Фотоелектронний помножувач являє собою електровакуумний прилад, що складається з фотокатода, системи вторинних емітерів електронів (діодів) і анода (колектора) з додатковими електродами.

Кванти електромагнітного випромінювання вибивають з фотокатода електрони. Під дією електричного поля між фотокатодом і першим електродом системи електрони прискорюються і спрямовуються на перший емітуючий електрод. За рахунок вторинної електронної емісії з першого діода вибивається в k разів електронів більше, ніж на нього падає. Внаслідок лавиноподібного процесу, який відбувається у фотопомножувачі, на аноді збирається в 10^5 — 10^{10} разів більше електронів, ніж було вибито з фотокатода. Типи фотокатодів ФЭУ такі, як і у фотоелементів (сурм'яно-цезієві, киснево-срібно-цезієві та ін.).

Найбільш поширені фотокатооди з напівпрозорого фоточутливого шару, який наноситься на внутрішній бік торцевої частини скляної колби фотопомножувача.

Конструктивно існують дві групи фотопомножувачів з фокусуючими і нефокусуючими електродами.

До першої групи належать фотопомножувачі, діоди яких виконані у вигляді коритоподібної поверхні (наприклад, типу ФЭУ-19, ФЭУ-24), до другої — фотопомножувачі, в яких діодні системи виконані у вигляді сіток або пластинок (наприклад, ФЭУ-11, ФЭУ-16). Число каскадів множення в сучасних серійних фотопомножувачах коливається від 8 до 14.

До найважливіших характеристик приладів із зовнішнім фото ефектом належать: інтегральна і спектральна чутливість фотокатода, інтегральна чутливість фотоелемента або фотоелектронного помножувача, коефіцієнт підсилення, величина темнового струму, стабільність роботи тощо.

В таблиці наведено деякі типи сучасних фотоелементів і фотопомножувачів та їхні основні характеристики.

1. Дослідження зовнішнього фотоефекту та визначення сталої Планка

Прилади і матеріали: 1) фотоелементи типу СДВ-3; 2) вольтметр типу М45М на 3—150 В; 3) прилад для вивчення фотоefекту; 4) набір світлофільтрів; 5) освітлювач; 6) випрямляч типу ВС-24М; 7) люксметр типу Ю-16.

Теоретичні відомості та опис приладів

У цьому завданні визначаються основні характеристики фотоелемента СЦВ-3: вольт-амперна (залежність фотоструму від прикладеної напруги); інтегральна чутливість γ (величина фотоструму, що виникає у фотоелементі при попаданні на нього одиниці світлового потоку); спектральна чутливість λ (залежність фотоструму від довжини хвилі);

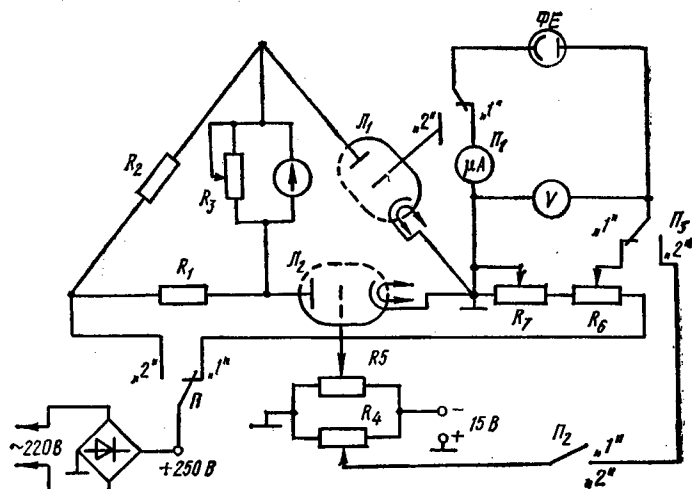


Рис. 136

світлова характеристика (залежність фотоструму від освітленості фотокатода).

Фотострум при сталій напрузі пропорційний потокові електромагнітного випромінювання:

$$I_{\dot{m}} = \gamma \Phi, \quad (1)$$

де Φ — потік світлової енергії, що дорівнює

$$\Phi = IS/l^2 \quad (2)$$

(тут I — сила світла освітлювача; S — площа фотокатода, $S = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; l — відстань від освітлювача до фотокатода). На підставі формул (а) і (2) знаходимо робочу формулу для визначення інтегральної чутливості фотоелемента:

$$\gamma = I_{\Phi} l^2 / IS. \quad (3)$$

Принципіальна схема для вивчення фотоефекту подається на рис. 136.

Електричну частину схеми скопійовано у вигляді приладу, на передню панель якого винесено гнізда для підмикання вольтметра, фотоелемента ΦE і випрямляча BC-24M (на 15 В).

Основною частиною є електронний місток, зібраний на подвійному тріоді типу 6Н9С. Тріоди працюють незалежно один від одного, опори R_1 і R_2 дорівнюють 1,3 кОм кожний (2 Вт).

Специфікація деталей приладу така: нуль-гальванометр типу М273/8 з малим внутрішнім опором; змінні резистори R_3, R_4, R_5, R_6, R_7 мають відповідно номінальні значення опорів 1,0; 22; 22; 4,7; 680; 22 кОм; потенціометр R_3 призначений для зміни чутливості гальванометра; R_4 — регулює потенціал на аноді фотоелемента; R_5 — регулює потенціал на сітці лампи \mathcal{L}_2 ; R_6, R_7 — регулюють напругу на фотоелементі (R_6 — «грубо», R_7 — «точно»); мікроамперметр типу М94 на 200 мкА. Живлення електронного містка здійснюється від кенотронного випрямляча.

Для визначення сталої Планка можна скористатися схемою рис. 136 (перемикачі P_1 , P_2 в положенні «2»).

Розглянемо роботу схеми при визначенні сталої Планка.

Фотоелемент ΦE включений у сіткове коло лампи L_1 . При відсутності світла опір ΦE дуже великий. Отже, електрони, які рухаються від катода до анода, нагромаджуються на сітці лампи і підвищують її потенціал. Потенціал сітки лампи L_2 відмінний від потенціалу сітки лампи L_1 , отже, через гальванометр піде слабкий струм. Потенціометром R_6 встановимо на сітці лампи L_2 такий потенціал, при якому струм, що проходить через гальванометр, дорівнює нулю. Місток зрівноважується.

Вольтметр покаже напругу U_0 . Поставимо перемикач P_2 у положення «2». Спрямуємо на фотоелемент світловий потік з частотою світла ν . Рівновага містка порушиться. Резистором R_4 подамо на фотоелемент затримуючу різницю потенціалів. Струм через фотоелемент зменшиться і потенціал сітки лампи L_1 знову набуде попереднього значення. Місток зрівноважиться. Вольтметр покаже різницю потенціалів U_1 , тоді затримуюча різниця потенціалів

$$U_s = U_1 - U_0. \quad (4)$$

Із формули (а) видно, що енергія фотоелектронів залежить від частоти падаючого світла. Це дає змогу визначити сталу Планка. На

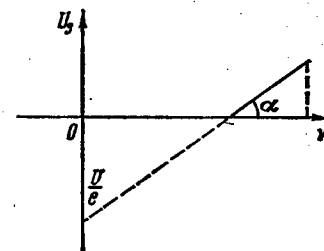


Рис. 137

основі формул (а) і (б) для двох частот дістанемо $h\nu_1 = A + eU_1$, $h\nu_2 = A + eU_2$, звідки

$$h = e(U_1 - U_2)/(\nu_1 - \nu_2), \quad (5)$$

де U_1 і U_2 — затримуючі різниці потенціалів. З другого боку, експериментально можна дістати залежність затримуючої різниці потенціалів від частоти падаючого світла:

Запишемо рівняння Ейнштейна у вигляді рівняння прямої на площині в координатах $U_s = f(\nu)$:

$$U_s = (h/e)\nu - (A/e). \quad (6)$$

Із рис. 137 і рівняння (6) видно, що

$$\text{tg } \alpha = h/e, \quad (7)$$

а продовження прямої до перетину з віссю U_s дає змогу визначити коефіцієнт A/e .

Порядок виконання роботи

1. Визначити основні характеристики сурм'яно-цезієвого фотоелемента.

1. До гнізд «U» і «ФЕ» підімкнути відповідні прилади.

2. Поставити ручки потенціометрів R_6 , R_7 у крайнє ліве положення, а перемикачі Π_1 , Π_2 , Π_3 у положення «1».

3. Увімкнути тумблер «220 В» приладу і освітлювач (відстань до освітлювача не менше 1,5 м, діафрагма мінімальна).

4. При значенні освітленості $E_1 = 2 \cdot 10^3$ лк і $E_1 = 3 \cdot 10^3$ лк зняти залежність фотоструму від напруги. Напругу змінювати через 10 В від 0 до 120 В. Дані занести до таблиці.

5. Побудувати вольт-амперні характеристики за результатами п. 4.

6. Встановити напругу 240 В і дослідити залежність фотоструму від освітленості (світлова характеристика). Дані занести до таблиці і подати графічно у вигляді залежності $I_\phi = f(E)$.

7. Обчислити згідно з (3) інтегральну чутливість фотоелемента для трьох значень світлових потоків. Освітленість виміряти люксометром.

8. Розрахувати похибку вимірювання інтегральної чутливості.

II. Визначити сталу Планка і роботу виходу з фотокатода.

1. Поставити перемикачі Π_1 , Π_3 в положення «2». Включити тумблер живлення.

2. Під'єднати до клем «15 В» випрямляч і встановити відповідну напругу.

3. Виміряти затримуючу різницю потенціалів за формулою (4) при освітленні фотоелемента червоним і фіолетовим світлом.

4. За формулою (5) визначити сталу Планка. Розрахувати похибки вимірювань.

5. Побудувати на основі формул (2) і (4) залежність $U_s = f(\nu)$, скориставшись набором світлофільтрів.

6. Визначити, користуючись формулою (5) і рис. 137, сталу Планка h і роботу виходу A .

7. Порівняти значення сталої Планка п. 6 з результатами п. 4 і табличними значеннями.

8. Розрахувати похибку вимірювань h і A .

Контрольні запитання

1. Пояснити на основі формули Ейнштейна закони фотоелектричного ефекту.
2. Які труднощі пояснення першого і другого законів фотоелектричного ефекту в хвильовій теорії світла?
3. Які ще є експериментальні підтвердження квантової природи світла?
4. Пояснити роботу вакуумного і газонаповненого фотоелементів.
5. Які основні характеристики фотоелементів?
6. Проаналізувати можливі причини розходження експериментально одержаних значень сталої Планка з табличними.
7. Пояснити принцип роботи схеми для вивчення зовнішнього фотоелектричного ефекту.

II. Дослідження фотоелектронного помножувача ФЭУ-2

Прилади і матеріали: 1) фотоелектронний помножувач ФЭУ-2; 2) випрямлячі типу ВУП; 3) мікроамперметри на 60—300 мкА, наприклад, типу Ц4311; 4) вольтметр на 300 В, наприклад, типу Э515.

Теоретичні відомості та опис приладів

У даному завданні пропонується визначити коефіцієнт вторинної електронної емісії δ і визначити його залежність від енергії первинних електронів. Розглянемо принцип роботи фотопомножувача.

Найпростішим є фотопомножувач з однокаскадним підсиленням фотоструму. Його будова відрізняється від будови фотоелемента нанесенням додаткового світлочутливого сурм'яно-цезієвого шару, який називають емітером. Між катодом і емітером розташований анод.

Під дією світла з поверхні фотокатода вибиваються електрони, які прискорюються електричним полем у напрямі до анода. Більша частина електронів пролітає анод і попадає на емітер. (Різниця потенціалів між катодом і анодом вища, ніж між емітером і анодом). Ці електрони вибивають з емітера вторинні електрони, які рухаються до анода і збираються на ньому. Якщо коефіцієнт вторинної електронної емісії більший за одиницю, то струм у колі анода більший, ніж в колі катода. Величина, яка дорівнює відношенню струму анода до струму катода, називається коефіцієнтом вторинної електронної емісії:

$$\delta = I_a/I_k. \quad (1)$$

На рис. 138 подано схему дослідження фотоелектронного помножувача.

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою рис. 138.
2. Регулятором напруги 2 змінювати напругу між емітером і катодом від 0 до 200 В через кожні 10 В.

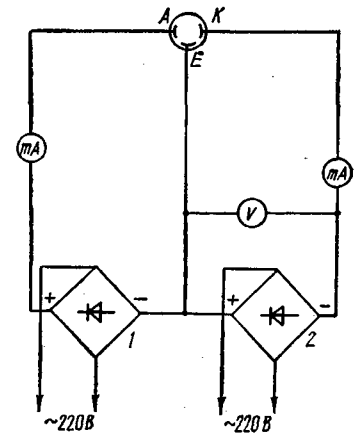


Рис. 138

3. Регулятором I між емітером і анодом послідовно встановлювати значення напруги 180, 200, 220, 250 В. Освітленість фотопомножувача при цьому мусить бути такою, щоб струм катода не перевищував 8—12 мкА.

4. Побудувати для кожного значення анодної напруги графік залежності струму в фотопомножувачі від напруги на емітері.

5. Обчислити для кожного випадку коефіцієнт δ . Підрахувати похибку вимірювань для одного із випадків.

Контрольні запитання

1. Який принцип роботи однокаскадного фотопомножувача?
2. При якій умові можна точно визначити коефіцієнт вторинної електронної емісії?

III. Дослідження багатокаскадного фотопомножувача ФЭУ-19М

Прилади і матеріали. 1) фотопомножувач ФЭУ-19М з подільником напруги; 2) високовольний випрямляч типу ВСВ-2 і два випрямлячі типу ВУП; 3) мікроамперметр типу Ц4311; 4) джерело з силою світла 0,28 кд; 5) оптична лава; 6) набір світлофільтрів; 7) люксметр типу Ю-16.

Теоретичні відомості та опис приладів

В завданні пропонується дослідити основні характеристики фотопомножувача: інтегральну та анодну чутливість, вольт-амперну характеристику, світлову характеристику.

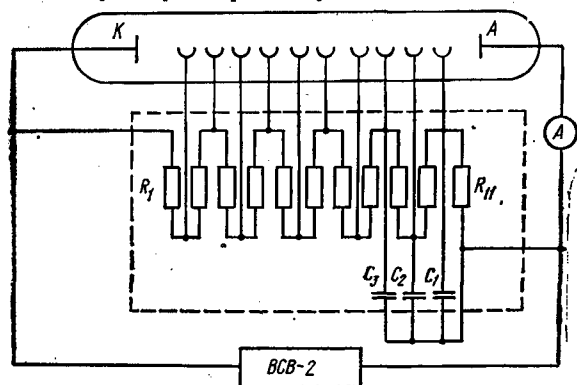


Рис. 139

Характеристики фотопомножувача ФЭУ-19М даються в табл. на с. 195. Фотопомножувач має 13 динодів. Струм на аноді

$$I_a = I_0 \sigma^n, \quad (1)$$

де I_0 — фотострум на першому емітері; n — число динодів; σ — коефіцієнт підсилення.

Інтегральна чутливість (в мікроамперах на люмен) фотопомножувача

$$\gamma = I_0 / \Phi. \quad (2)$$

Анодна чутливість (в амперах на люмен)

$$\gamma_a = \gamma \sigma^n \quad (3)$$

(анодна чутливість — це величина анодного струму, що виникає в фотопомножувачі при дії світлового потоку в 1 лм).

Схема установки дається на рис. 139.

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою рис. 139.

Увага! Ознайомитись із заводською інструкцією високовольного випрямляча ВСВ-2. Перемикач напруги «грубо» мусить знаходитися в крайньому лівому положенні, а перемикач полярності — в положенні «+».

2. Впевнитися, що світловий потік не перевищує 10^{-6} лм. (Робоча площа катода $9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.) При сталому світловому потоці зняти вольт-амперну характеристику фотопомножувача; напругу змінювати через 50 В до 1300 В. Покази мікроамперметра і відповідну напругу занести до таблиці. Побудувати графік.

3. Дослідити світлову характеристику ФЭУ-19М (залежність фотоструму від світлового потоку при сталій напрузі). Експеримент провести при двох значеннях напруги — 600 і 800 В. Дані занести до таблиці і побудувати графік. Визначити границю лінійності світлової характеристики.

4. Визначити з даних досліду інтегральну і анодну чутливості фотопомножувача (для визначення інтегральної чутливості катода зробити відвід од першого емітера і виконати вимірювання, як для фотоелемента в завданні II).

5. Визначити коефіцієнт підсилення $k = \gamma_a / \gamma$.

6. Обчислити похибку вимірювань, порівняти обчислені значення інтегральної чутливості з табличними, зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Пояснити принцип роботи багатокаскадного фотопомножувача.
2. Дати означення анодної та інтегральної чутливості фотопомножувача.
3. Де застосовують фотопомножувачі?

Розділ п'ятий

ФІЗИКА АТОМА, ТВЕРДОГО ТІЛА І АТОМНОГО ЯДРА

24. Вивчення ефекту Франка і Герца [22, 26, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) тиратрон ТГ1—0,1/0,3; 2) електронний осцилограф С1—1; 3) звуковий генератор ГЗ-18; 4) випрямляч ВС-24М; 5) вольтметр Э515; 6) керамічний опір 280 кОм.

Теоретичні відомості та опис установки

Досліди Франка і Герца були яскравим експериментальним підтвердженням постулатів Н. Бора про існування стаціонарних енергетичних станів атомів та випускання або поглинання атомом кванта

випромінювання при переході з одного стаціонарного стану в інший.

Якщо атоми будь-якої речовини, які перебувають у газоподібному стані, опромінювати потоком електронів, між ними відбувається взаємодія, внаслідок чого енергетичні стани атомів можуть змінюватися. Ця взаємодія може носити характер пружного або непружного ударів. Для встановлення характеру співударів потрібно дослідити розподіл швидкостей електронів після співударів з атомами, оскільки початковий розподіл відомий. Дж. Франк і Г. Герц показали, що коли енергія

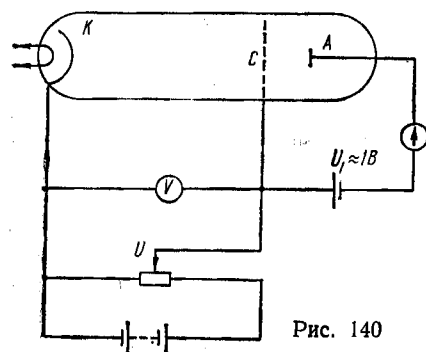


Рис. 140

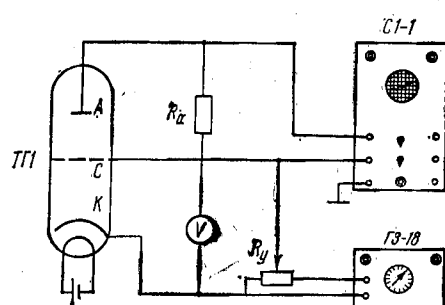


Рис. 141

електронів менша за деяку критичну, то співудари між електронами і атомами відбуваються пружно. При такому співударі значення швидкості електрона практично не змінюється, може змінитися лише її напрям. Тобто атом при цьому енергії не дістає, а електрон рухається з початковою кінетичною енергією. При непружних співударах внаслідок того, що маса електрона значно менша за масу атома, він передає атому майже всю свою енергію. Атом переходить у вищий енергетичний стан, а електрон різко зменшує швидкість. Виявилось, що непружні зіткнення електронів з атомами відбуваються при строго визначеному ряді значень кінетичної енергії електронів.

Розподіл швидкостей електронів після співударів з атомами досліджували за допомогою методу затримуючого потенціалу. Найпростішу схему для проведення дослідів Франка і Герца подано на рис. 140. Нехай між катодом і анодом прикладено прискорюючу різницю потенціалів U . Прискорені електрони прямують до анода А, розташованого за сіткою С. Якщо на сітку подати потенціал $+U_1$, то у просторі між сіткою і анодом виникне гальмуюче електричне поле. Тому лише ті електрони, які мають кінетичну енергію

$$mv_x^2/2 \geq eU_1,$$

можуть досягти анода А. Змінюючи затримуючий потенціал U_1 і водночас вимірюючи значення струму в анодному колі, можна побудувати вольт-амперну характеристику, що дасть змогу обчислити розподіл швидкостей між електронами. Якщо енергія електронів менша за критичну, взаємодія їх з атомами газу має пружний характер, а енергія дорівнює eU . Вони досить легко долають гальмуюче поле і досягають анода. Із збільшенням U анодний струм поступово зростає. При критичному значенні напруги U , а отже, й енергії електрона з ве-

ликою імовірністю відбувається не пружна взаємодія. Віддавши всю енергію атомові, електрон не може подолати гальмуючого поля, не досягає анода, тобто не вносить вкладу у значення анодного струму. При збільшенні потенціалу анода U можна спостерігати не лише перше непружне збудження атомів, а й друге і третє. Це проявляється на вольт-амперній характеристиці у вигляді максимумів та мінімумів анодного струму.

Поряд з такою особливістю у поведінці анодного струму досить важливим є те, що у досліді спостерігається світіння газу. Причому інтенсивність випромінювання з певною довжиною хвилі відповідає мінімуму анодного струму. Таку залежність можна пояснити тим, що після інтенсивного збудження атоми газу через час порядку 10^{-8} с переходять у нормальний стан, а надлишок енергії випускають у вигляді випромінювання певної довжини хвилі.

У даній роботі використовується тиратрон ТГ1-0,1/0,3, заповнений інертним газом аргоном. Схема установки зображена на рис. 141. Прискорююча напруга U між катодом і сіткою подається з виходу звукового генератора і може регулюватись за допомогою потенціометра R_y . Електронний осцилограф призначений для спостереження за вольт-амперною характеристикою тиратрона. Гальмуюче поле створюється напругою, яка знімається з анодного опору R_a .

На вертикально відхиляючі пластини осцилографа подається спад напруги на опорі R_a , пропорційний значенню анодного струму. На горизонтально відхиляючі пластини подається напруга горизонтальної розгортки. Залежно від амплітуди напруги між катодом і сіткою на вольт-амперній характеристиці спостерігається відповідна кількість мінімумів та максимумів.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку за схемою рис. 141.
2. Увімкнути випрямляч у колі розжарення катода тиратрона та звуковий генератор.
3. Увімкнути осцилограф. Здійснити фокусування електронного променя. Підбираючи частоту розгортки та підсилення, дістати зображення вольт-амперної характеристики тиратрона.
4. Повільно збільшуючи прискорюючу напругу з виходу звукового генератора, пересвідчитися в існуванні максимумів та мінімумів на характеристиці.
5. Підібравши частоту прискорюючої напруги та частоту розгортки, повторити дослід, фіксуючи покази вольтметра, що відповідають першому, другому і третьому мінімумам анодного струму.
6. На основі одержаних даних визначити різницю значень енергії атома аргону на основному та першому збудженому енергетичних рівнях.
7. Користуючись одержаними значеннями енергії ΔE , обчислити довжину хвилі резонансного випромінювання аргону та порівняти ці значення з табличними.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте постулати Бора.
2. Як залежить форма вольт-амперної характеристики від тиску газу в балоні лампи?
3. Чому мінімальне значення анодного струму не дорівнює нулю?
4. Як пояснюється світіння газів в електричному розряді?

25. Дослідження спектра випромінювання атомарного водню [22, 25, 30, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) спектрограф КСА-1; 2) фотопластинки або фотоплівка; 3) вимірювальний мікроскоп; 4) ртутно-кварцова лампа типу ПРК-2.

Теоретичні відомості та опис приладу

Експериментом встановлено, що розміщення ліній випромінювання (поглинання) у спектрі водню підлягає певній закономірності. Лінії водню розміщуються серіями у видимій (серія Бальмера), ультрафіолетовій (серія Лаймана), інфрачервоній (серія Пашена), а також у далекій інфрачервоній (серії Бреккета та Пфунда) частинах спектра. Між хвильовим числом спектральних ліній $\tilde{\nu} = 1/\lambda$ (λ — довжина хвилі) та головними квантовими числами n_i і n_k існує простий зв'язок:

$$\tilde{\nu} = R_H (1/n_i^2 - 1/n_k^2), \quad (1)$$

де R_H — стала Рідберга.

Для ліній серії Лаймана $n_i = 1$, а $n_k = 2, 3, 4, \dots$ і т. д., для ліній серії Бальмера $n_i = 2$, $n_k = 3, 4, 5, \dots$ і т. д.

При переході з одного енергетичного рівня на інший випромінюється або поглинається квант енергії. Енергія кванта

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (2)$$

де h — стала Планка, ν — частота випромінювання; E_1, E_2 — енергії двох відповідних станів атома.

Для визначення сталої Рідберга використовується рівняння (1), де невідомим є лише хвильове число (або довжина хвилі) спектральної лінії. Для цього необхідно знайти довжину хвилі чотирьох ліній. Як дисперсійний прилад використовується спектрограф КСА-1 (спектрограф кварцово-скляний автоколімаційного типу). КСА-1 використовується у практиці тільки у варіанті з скляною оптикою. На рис. 142 подано його спрощену оптичну схему. Промінь світла від джерела 3 проходить через конденсорну лінзу 2 і далі за допомогою дзеркала 1 спрямовується через конденсор 4 і діафрагму 5 на щілину 6 і, відбившись від дзеркала 9, йде до об'єктива 8. З об'єктива паралельний пучок проходить призму 7 і, відбившись від її дзеркальної грані, вдруге проходить призму у зворотному напрямі. З призми виходить диспергований пучок, який далі об'єктивом 8 фокусується у площині касети 10, даючи спектр досліджуваного джерела. Щоб дзеркало 9 не закривало вихідний пучок, останній трохи зміщений відносно вхідного у вертикальній площині. Спектральний діапазон приладу 360—800 нм, при цьому довжина спектра становить 33 см. Проте весь

спектр одночасно сфотографувати не можна, оскільки довжина пластинки не перевищує 24 см. Щоб сфотографувати потрібну частину спектра, його переміщують відносно касети поворотом призми. Водночас треба для збереження фокусування переміщувати об'єктив 8 і змінювати нахил касетної площини до осі пучка. Всі ці рухи здійснюються за допомогою маховичка 9 (рис. 143), який, крім цього, обертає барабан 10. По шкалі 8 цього барабана визначають встановлений діапазон. Касетна частина 2 може обертатися навколо осі 11. Гвинтом 12 закріплюють маховичок 9 в обраному положенні.

Рис. 142

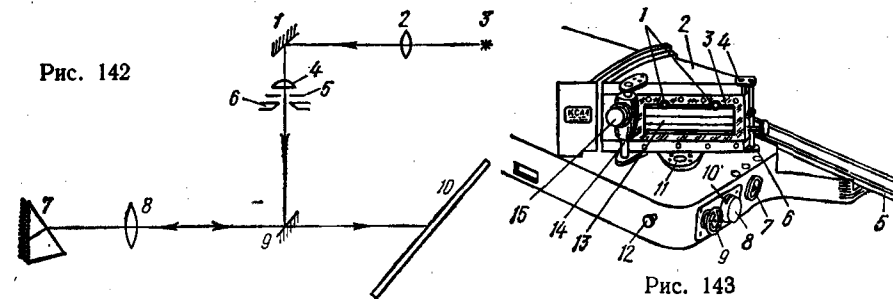


Рис. 143

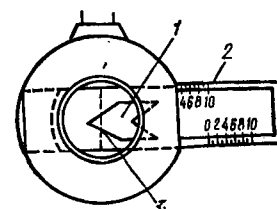


Рис. 144

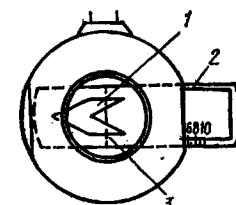


Рис. 145

Спектр можна спостерігати у прорізі 13 касетної частини, якщо дивитись уздовж осі приладу. Касета закріплюється у рамці 3 двома гвинтовими затискачами 1. Рамка з касетою може рухатись вертикально відносно отвору 13 по напрямних стержнях 6 і 14. Цей рух здійснюється за допомогою рукоятки 15, а положення касети фіксується по шкалі 15.

Для керування експозицією при зйомці у приладі є світловий затвор, який відкривається і закривається ручкою 7.

Допоміжні прилади, такі як досліджувані і еталонні джерела, конденсори, а також допоміжні дзеркала розміщуються на рейці 5, яка жорстко зв'язана з корпусом спектрографа. Ширина спектра задається щільною діафрагмою і дорівнює висоті відкритої частини щілини. Щільна діафрагма дає змогу дістати спектрограми (досліджувану і еталонну) впритул на одному знімку без будь-якого переміщення касети, що потрібно при точних вимірюваннях. На рис. 144 показано відносне положення щілини 3 і діафрагми 2 при експонуванні досліджуваного спектра, а на рис. 145 — при експонуванні спектра заліза (1 — виріз діафрагми). Таким способом одержується спектрограма, оточена з обох боків спектрограмою порівняння, що зручно при вимірюванні.

Нормальна ширина щілини близько 10 мкм. Регулюється ширина щілини мікрометричним гвинтом з відліковим барабаном, ціна поділки якого дорівнює 1 мкм.

При вимірюванні спектрограм основною метою є визначення відносних значень довжин хвиль спектральних ліній у системі довжин хвиль спектра порівняння. На початку вимірювань спектрограма встановлюється у приладі так, щоб відлік на обрану лінію спектра порівняння біля середини спектра при обох положеннях спектрограми (фіолетовий кінець праворуч, фіолетовий кінець ліворуч) був однаковий. Нехай, наприклад, він дорівнює 90. У цьому випадку сума відліків при обох положеннях спектрограми для всіх ліній буде більш-менш однаковою і близькою до 180. Віднімаючи всі відліки при другому положенні від суми (у даному випадку від 180), закруглюючи її, дістаємо відліки для всіх ліній, близькі за значенням до відліків для тих самих ліній при першому положенні. Для зручності розрахунків бажано, щоб відліки при першому положенні збільшувались із збільшенням довжини хвилі. Знаходячи середнє трьох відліків при першому положенні та редукованому другому положенні, одержують результат, який значною мірою позбавлений певних суб'єктивних похибок наведення, або характеру та вигляду різних спектральних ліній.

Порядок виконання роботи

1. Перед експонуванням плівки добитися найбільшої інтенсивності зображення спектра випромінювання, контроль якого здійснюється з боку касетної частини спектрографа за допомогою лупи.

2. На фотопластинку (або фотоплівку) одночасно із спектром водню (серія Бальмера) фотографують дуговий спектр заліза (спектр порівняння), лінії якого відомі.

3. Проявити, закріпити, промити та просушити плівку (пластинку).

4. Обробити спектрограми за допомогою вимірювального мікроскопа.

5. За допомогою формули Гартмана

$$\lambda - \lambda_0 = c/(x_0 - x) \quad (3)$$

за трьома відомими значеннями довжини хвилі $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ та за відліками для них визначити сталі λ_0, c, x_0 .

6. Обчислити λ за відомим x або x за табличним значенням λ для всіх ліній спектра порівняння.

Коли інтервал $\lambda_3 - \lambda_1$ досить значний (40 нм і більше) і обчислені значення x систематично відрізняються від табличних (причому ці відхилення мають певний напрям), то необхідно визначити емпіричні поправки $\Delta\lambda$ або Δx для кожної ділянки спектра і замість формули (3) скористатися формулою

$$\lambda - \lambda_0 = c/(x_0 - x - \Delta x) \quad \text{або} \quad x_0 - x = c/(\lambda + \lambda_x - \lambda_0).$$

Вимірювання провести окремо для кожної частини видимої області, в яких розміщені довжини хвиль ліній водню. Вибір ліній порівняння, а також визначення їх довжин хвиль проводяться за допомогою атласа

дугового спектра заліза. Для ліній порівняння обрати поодинокі лінії, інтенсивності яких близькі до інтенсивностей ліній, довжини хвиль яких потрібно визначити.

7. Обчисливши довжини хвиль чотирьох ліній серії Бальмера, знайти R_H .

8. Знайти відносну і абсолютну похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Що є джерелом лінійчастого, смугастого та суцільного спектрів?
2. Чому спектр хімічного елемента у газоподібному стані лінійчастий, а у твердому стані суцільний?
3. Чому фотокасета спектрографа нахилена під деяким кутом до оптичної осі фотокамери?
4. Що треба змінити в оптичній схемі спектрографа для того, щоб дістати спектр водню в ультрафіолетовій області спектра?

26. Спектральний аналіз сплавів за допомогою стилометра [30, 25, 27, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) стилометр з іскровим генератором і штативним блоком; 2) еталонний та досліджуваний електроди.

Теоретичні відомості та опис приладу

Однією з основних індивідуальних характеристик газоподібного стану речовин є спектр випромінювання, зумовлений хімічною будовою речовини. Кожна лінія цього спектра відповідає певному переходу атома з одного енергетичного стану до іншого. Всі елементи періодичної системи елементів Менделєєва мають свій спектр випромінювання, і ця особливість використовується для спектрального аналізу речовин.

Якщо є суміші різних елементів, спектр випромінювання атомів цієї суміші містить спектральні лінії всіх складових. Якісний аналіз полягає у виявленні і ототожненні в спектрі аналізованої речовини спектральних ліній, що належать шуканому елементу. Кількісний же аналіз дає змогу встановити процентний вміст окремих елементів у суміші. Це робиться за допомогою порівняння інтенсивностей спектральної лінії шуканого елемента суміші і лінії основного елемента еталонного зразка.

Інтенсивність спектральних ліній у спектрах речовин залежить від багатьох факторів. Зокрема, інтенсивність спектральної лінії і будь-якої складової частини суміші залежить від її концентрації c . Ця залежність виражається таким співвідношенням:

$$I = \alpha c^\beta,$$

де α і β — характерні для кожної лінії параметри. Слід зауважити, що концентрація кожного елемента в сплаві дещо інша, ніж у парах, які світаються (дуга, іскра). Це можна пояснити різними швидкостями випаровування і дифузії різних речовин. Залежність інтенсивності спектральної лінії елемента від концентрації цього елемента в суміші подано графічно на рис. 146. Інтенсивність монотонно зростає із збільшенням c , досягаючи певного «насичення». Такий характер залежності

$I = f(c)$ пов'язаний із самовбиранням випромінювання. Тобто, із збільшенням концентрації елемента зростає кількість атомів, які випромінюють. Поряд з цим зростає ступінь вибирання випромінювання незбудженими атомами. При малих концентраціях елементів у суміші самовбирання практично не існує, отже, можна вважати, що $\beta = 1$.

Спектральний аналіз проводять за допомогою стилόμεтра. Вітчизняна промисловість випускає стилόμεтр СТ-7 для експресного якісного і кількісного аналізу деяких металів та сплавів. Значною перевагою застосування стилόμεтра є майже повна відсутність пошкодження проби при аналізах, що дає змогу аналізувати готові деталі, напівфабрикати тощо.

Принципіальну оптичну схему стилόμεтра подано на рис. 147.

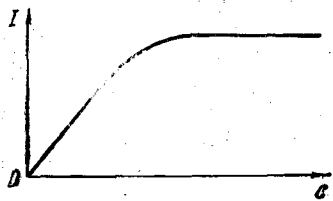


Рис. 146

Світло від іскри концентрується конденсором 1 на щілині 2. Проїшовши призму 3, світловий пучок попадає на коліматорний об'єктив 4 і розкладається блоком диспергуючих призм 16, 15, 14.

Дійсне зображення спектра фокусується об'єктивом зорової труби 13 у площині, яка перетинає гіпотенузну грань призми 17. Потрібний напрям зорової труби задається призмою 12. Частина спектра призма пропускає в напрямі фотометричного клина 18 і призми 19, друга частина світла після відбивання від срібного шару 11 призми 17 проходить через фотометричний клин 6 і призму 5. Після цього обидві частини спектра фокусуються в полі зору окуляра 10 за допомогою обертальних систем 7, 8, 9, 20, 21, 22. Призми 22 і 9 направляють світло вздовж оптичної осі окуляра 10.

Приведення порівнювальних ліній до межі поділу досягається обертанням блока диспергуючих призм 14, 15, 16 і переміщенням призми 19 та обертової лінзи 20 як єдиного цілого вздовж оптичної осі лінзи 20.

До правого і лівого фотометричних клинів жорстко прикріплено скляні пластинки 29 з нанесеними на них шкалами, які освітлюються

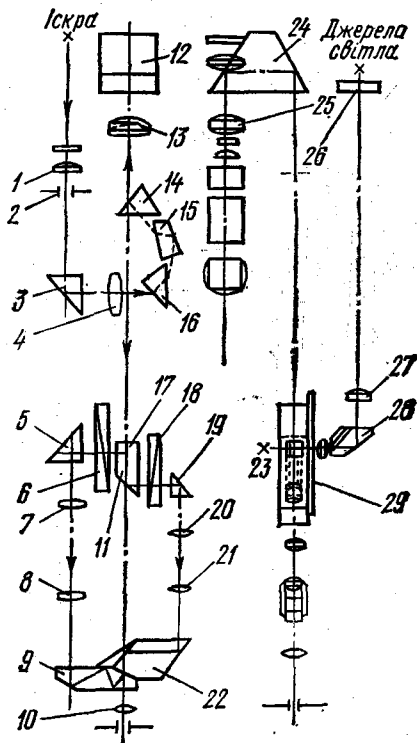


Рис. 147

лампочкою 23. Призма 28 направляє промені від лампочки 23 на проекційний об'єктив 27, який дає зображення шкал на екрані 26.

Зовнішній вигляд стилόμεтра подано на рис. 148. Труба з конденсором і щілиною змонтована в корпусі, і регулювання положення диспергуючих призм здійснюється за допомогою барабана 3, ручкою 4 регулюють положення поворотної призми, а положення об'єктива ручкою 10. За допомогою ручок 7 і 9 здійснюється зміщення фотометричних клинів. Для зручності роботи оператора на приладі змонтовано сліпу оправу 5 в парі з окуляром 6. Кнопка 8 служить для спостереження зображення на екрані 2 двох шкал (рис. 149), за допомогою яких визначається положення фотометричних клинів. Ліва шкала дає

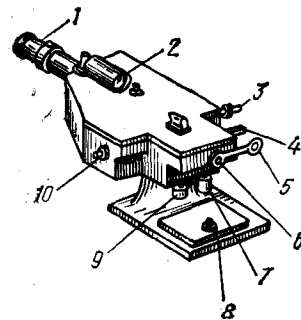


Рис. 148

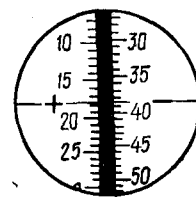


Рис. 149

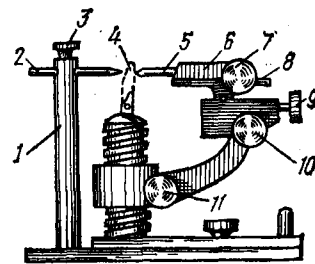


Рис. 150

змогу зафіксувати положення фотометричних клинів (за допомогою її фіксується положення фотометричного клина 18 (рис. 147), а за допомогою правої — клина 6.

Мірою відносної інтенсивності порівнюваних спектральних ліній є алгебраїчна сума відліків по обох шкалах після зрівняння яскравостей цих ліній.

Як правило, при роботі з стилόμεтром спектр збуджується конденсованою іскрою через утворення розряду в зазорі між досліджуваними електродами. Для цього служить спеціальний генератор конденсованої іскри ИГ-3, який працює в режимі дуги.

Для поліпшення експлуатаційних властивостей стилόμεтра в його комплект входить глушник, призначений для зменшення шуму, що виникає при роботі стилόμεтра, а також для захисту оператора від дотикування з електродами, які знаходяться під високою напругою.

Глушник — дерев'яний ящик без дна, оббитий всередині асбестом і мінеральною ватою. Всередині глушника знаходиться штативний блок. Дверцята глушника обладнані автоблокуючим пристроєм (при відкритих дверцятах навіть увімкненого в електромережу генератора ИГ-3 на штативний блок не подається напруга).

Штативний блок (рис. 150) призначений для встановлення досліджуваних зразків у робоче положення. Один з електродів 2 закріплено гвинтом 3 у тримачі 1. Другий електрод 5 вміщено на підйомному столику 7 і закріплено лежцатами 6 за допомогою ручки 8. Для встановлення певної відстані між електродами служить шаблон 4, який можна висувати вгору. За допомогою ручок 9, 10 і 11 столик можна повертати

навколо горизонтальної осі, переміщувати у напрямі, перпендикулярному до площини рисунка, або у вертикальному напрямі.

До комплексу установки входять:

1. Дисперсійна крива стилметра. За допомогою цієї кривої визначається залежність між довжиною хвилі спектральної лінії і положенням її по шкалі барабана приладу.

2. Атлас спектральних ліній заліза.

3. Градувальний графік для визначення процентного вмісту хрому.

Середня відносна похибка одного вимірювання становить $\pm 3 - 7\%$.

Порядок виконання роботи

1. Для визначення процентного вмісту домішок у деякому сплаві, наприклад домішок хрому у залізі, попередньо підготувати установку до роботи. Перш за все підготувати до роботи еталонний та досліджуваний електроди, конфігурація і розміри яких повинні відповідати зазначеним на рис. 151. Для цього: а) очистити їх від корозії та окалини і т. п. Особливо старанно потрібно зачищати робочі поверхні обох елек-

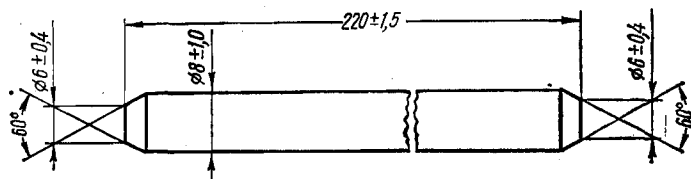


Рис. 151

тродів; б) еталонний електрод закріпити у тримачі 1, а досліджуваний у лещатах 6 (при цьому за допомогою шаблону встановити відповідну відстань між електродами). Закривши дверцята глушника, увімкнути генератор ИГ-3 в електромережу. Коли засвітиться контрольна лампочка, натиснувши кнопку «Пуск», запалити дугу між електродами. Увімкнувши генератор, провести попереднє випалювання електродів.

П р и м і т к а. Мета випалювання — привести поверхні і температуру електродів до стану, який залишається потім незмінним протягом усього аналізу. Процеси встановлення, які відбуваються в перші хвилини після включення іскри, роблять спектральну картину нестійкою, тому кількісні вимірювання можливі лише через деякий час після увімкнення іскри. Тривалість випалювання 2—3 хв.

Сила струму під час випалювання, а також протягом роботи генератора повинна становити 2—3 А при напрузі в мережі 220 В. Іскра повинна рівномірно оббігати всю робочу площу електродів. Це рівномірне оббігання повинно тривати протягом усього випалювання та аналізу. Якщо воно не виконується, тобто іскра починає бити в одну точку, що зразу помітно по збільшенню сили струму і по характеру шуму іскри, то випалювання і вимірювання слід одразу припинити і, кілька раз включивши вимикач, спробувати домогтися рівномірного оббігання іскрою всієї площадки. Якщо це не вдається, то слід робочі поверхні обох електродів зачищати знову.

Випалювання і вимірювання іскрою, що б'є в одну точку, абсолютно неприпустимі.

Вказане випалювання слід робити не тільки свіжозаточеним зразком, а й в тих випадках, коли вимірювання були з якихось причин перервані і іскра виключалась на час, більший ніж 2—3 хв.

2. Під час випалювання провести якісний аналіз. Для цього, повертаючи блок призми, проглянути весь спектр і визначити наявність у ньому характерних ліній тих чи інших елементів. Після цього приступити до кількісного аналізу.

3. Обертанням кільця окуляра 6 (рис. 148) сфокусувати рамку поля зору. Повертаючи ручку 4, сумістити прогалину в довгій ділянці спектра з центральною рамкою, в результаті чого в полі зору окуляра буде видно неперервну ділянку спектра. Ручкою 10 сфокусувати спектральні лінії.

4. За допомогою дисперсійної кривої стилметра визначити положення на шкалі барабана двох порівняльних ліній — хрому (520, 60 нм) і заліза (522, 70 нм).

5. На барабані 3 встановити знайдене положення і порівняти спектр в окулярі стилметра з атласом спектральних ліній заліза. Ототожнити видимі лінії із зазначеними вище лініями хрому і заліза.

6. За допомогою барабана 3 підвести лінію заліза до межі поділу центральної і лівої рамок. Для цього встановити її справа від цієї межі, а лінію хрому повертанням ручки 4 встановити зліва від неї.

7. За допомогою ручок 7 і 9 зрівняти інтенсивності порівнювальних ліній. Натиснувши кнопку 8, освітити екран і записати алгебраїчну суму показів обох шкал. Порухуючи рівність інтенсивностей, повторити попередню операцію кілька разів для досліджуваних зразків.

8. За даними 4—5 значень алгебраїчної суми, для кожного зразка обчислити її середнє значення і за градувальним графіком визначити процентний вміст хрому в цих зразках.

Контрольні запитання

1. Які фізичні основи спектрального аналізу?
2. В якому агрегатному стані розжарена речовина випромінює суцільний спектр, а в якому лінійчастий спектр?
3. В якій частині спектра найзручніше проводити якісний і кількісний спектральний аналіз?
4. Для чого штативний блок вміщують у глушник?

27. Дослідження лазера і вимірювання кута розходження світлового пучка [26, 28, заводські інструкції]

П р и л а д и і м а т е р і а л и: 1) оптична лава; 2) квантовий генератор ЛГ-56; 3) масштабна лінійка; 4) рулетка; 5) поляроїд; 6) дифракційна решітка; 7) екран з короткофокусною лінзою; 8) плоскопаралельна скляна пластинка.

Теоретичні відомості та опис приладів

Лазери — це генератори електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, дія яких ґрунтується на використанні індукованого (вимушеного) випускання. В деяких квантових системах можна штучно створити такі умови, при яких населеність верхнього енергетичного рівня E_2 буде більшою, ніж населеність нижнього рівня E_1 . Такий стан системи називають станом з *інверсною населеністю рівнів*, а середовище — інверсним, або активним. Якщо в активне середовище вводиться фотон з частотою $\nu = (E_2 - E_1)/h$, то це викликає лавино-

подібне народження нових фотонів за рахунок переходу атомів із стану E_2 у стан E_1 . Зрозуміло, що в середовищі відбуватимуться також переходи $E_1 \rightarrow E_2$, але їх кількість залишається досить малою, тому що середовище інверсне.

У кожній області простору, заповненій активною речовиною, зростання інтенсивності електромагнітної хвилі буде пропорційне енергії самої хвилі:

$$dI/dx = \alpha I_0, \quad (1)$$

де α — коефіцієнт квантового підсилення речовини; I_0 — початкова інтенсивність хвилі.

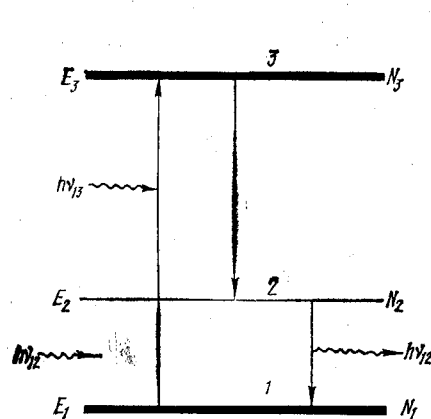


Рис. 152

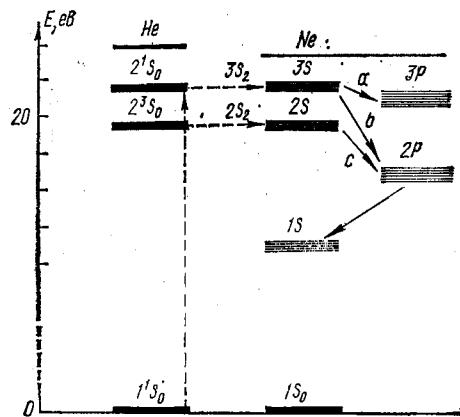


Рис. 153

У реальних речовинах завжди є фактори, які послаблюють інтенсивність, — розсіювання на неоднорідностях, збудження іншої пари рівнів, невелике число переходів $E_1 \rightarrow E_2$ тощо. Тому з урахуванням поглинання формулу (1) можна записати так:

$$dI/dx = (\alpha - \beta) I_0, \quad (2)$$

де β характеризує втрати енергії в речовині. Розв'язавши (2), дістанемо закон зміни сумарної інтенсивності залежно від відстані, яку проходить хвиля в активній речовині:

$$I = I_0 e^{(\alpha - \beta)x}. \quad (3)$$

Як бачимо з (3), обов'язковою умовою квантового підсилення, крім інверсної населеності рівнів, є виконання умови $\alpha > \beta$. Тобто випускання активних атомів повинно з надлишком компенсувати втрати електромагнітної хвилі у речовині.

Для створення інверсної населеності рівнів використовується три- або чотирирівнева система. Причому серед рівнів повинен бути один, час життя на якому більший, ніж у інших (метастабільний рівень). Ширина ΔE рівня та час життя атома на ньому Δt пов'язані співвідношенням невизначеностей Гейзенберга:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2.$$

Якщо час життя атома на рівні великий, то цей метастабільний рівень буде досить вузьким. Нехай існує трирівнева система (рис. 152),

де E_1 — основний рівень, E_2 — збуджений метастабільний (вузький) рівень, E_3 — збуджений короткоживучий (широкий) рівень. Спрямуємо на середовище пучок електромагнітних хвиль $\hbar\nu_{13} = E_3 - E_1$, тоді частина атомів з енергетичного рівня 1 перейде на рівень 3 (здійсниться так звана *накачка*). Під час накачки відбуваються поряд із зворотними переходами $3 \rightarrow 1$ самочинні переходи $3 \rightarrow 2$, які інтенсивно збільшують населеність рівня 2. Час життя на цьому рівні досить великий, і інверсія поступово зростає. Слабка зовнішня дія (фотон з частотою $\nu = E_2 - E_1/\hbar$) викликає велику кількість вимушених випускних переходів $2 \rightarrow 1$. Внаслідок цього система випускає *когерентне випромінювання*, підсилюючи вхідний сигнал. Система з інверсною населеністю рівня 2 може і сама, без зовнішньої дії, випускати випромінювання. Цілком імовірно, що саме це і повинно відбутися хоча б один перехід $2 \rightarrow 1$, який викличе лавиноподібне зростання інтенсивності випромінювання згідно з формулою (3). Існують різні типи лазерів, але робота кожного з них базується на однакових фізичних принципах. Відмінність їх полягає, головним чином, у методах збудження активного середовища, тобто у способі накачки. Так, у *твердотільних лазерах* застосовують оптичну накачку, у *газових* — електричний розряд, у *напівпровідникових* — інжекцію носіїв заряду.

Газові лазери мають ряд переваг порівняно з іншими типами генераторів електромагнітного випромінювання. У них активне середовище знаходиться у стані газорозрядної плазми, тобто частинки становлять сукупність іонів та електронів. Вони досить слабо взаємодіють між собою, а це означає, що лінії самочинного випускання та поглинання дуже вузькі. Тому ширина лінії генерації газового лазера мінімальна порівняно з іншими генераторами. З другого боку, газ в оптичному відношенні є однорідним середовищем, тобто у формулі (3) β мале. У даній роботі досліджується гелій-неоновий лазер. Розглянемо діаграму нижніх енергетичних станів гелію та неону (рис. 153).

У газорозрядній трубці лазера, заповненій сумішшю гелію та неону, при виникненні електричного розряду відбувається збудження атомів. В основному збуджуються атоми гелію, оскільки їх концентрація в 10 раз більша, ніж концентрація неону. При збудженні за рахунок електронних ударів атоми гелію переходять з основного стану 1^1S_0 у перші збуджені стани 2^3S_0 і 2^1S_0 . Енергія перших збуджених станів гелію практично збігається з енергією деяких станів неону ($2^1S_0 \rightarrow 3S_2$; $2^3S_0 \rightarrow 2S_2$). Збіг цих рівнів приводить до того, що метастабільні атоми гелію при співударах з незбудженими атомами неону переводять їх на один з рівнів збуджених станів $2S$ і $3S$, і при певних умовах середовище стає оптично активним. Дуже важливим для роботи гелій-неонового лазера є те, що переходи атомів неону з рівнів $3P$ і $2P$ на рівень $1S$ надзвичайно швидкі, тому концентрація атомів на цих рівнях завжди дуже мала. Найчастіше лазерне випромінювання виникає внаслідок переходів (відповідно b , c , a на рис. 153):

$$3S_2 \rightarrow 2P_4, \quad \lambda = 632,8 \text{ нм};$$

$$2S_2 \rightarrow 2P_4, \quad \lambda = 1152 \text{ нм};$$

$$3S_2 \rightarrow 3P_4, \quad \lambda = 3390 \text{ нм}.$$

Взагалі генерація може спостерігатись одночасно на кількох лініях. Підбором системи дзеркал резонатора, введенням диспергуючого або вибірково поглинаючого елемента можна створити оптимальні умови генерації для однієї лінії та заглушити для інших. Таким чином, у гелій-неоновому лазері гелій виконує функцію резервуара збудження, яке резонансно передається атомам неону. Неон є *робочою речовиною*. У газових лазерах замість неону можна використовувати й інші інертні гази. Схеми їх рівнів подібні до розглянутих вище. Лінії випускання газових лазерів перекривають спектральний діапазон від ультрафіолетової області до інфрачервоної.

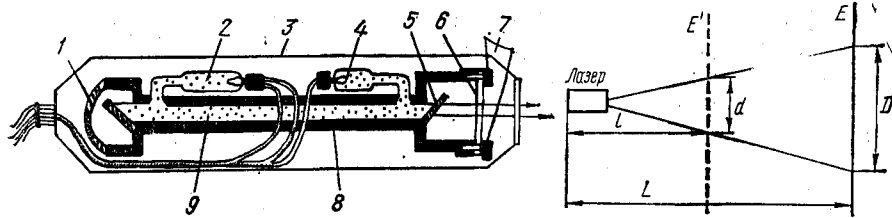


Рис. 154

Гелій-неоновий лазер складається з оптичного резонатора, активного середовища й захисної оболонки. Оптичний резонатор утворений сферичним 1 (рис. 154) та плоским 6 дзеркалами, жорстко закріпленими у сталевих фланцях, які скріплені між собою інваровими стержнями 8. За допомогою юстувальних гвинтів 7 положення дзеркал відносно осі резонатора можна змінювати у невеликих межах. Активний елемент 9 (газорозрядна трубка, заповнена сумішшю гелію і неону, завдовжки 25 см з підігрівним катодом 2 і анодом 4) закріплений між напрямними стержнями 8. Торці газорозрядної трубки відшліфовані під кутом Брюстера і закриті вихідними вікнами 5 із оптичного кварцового скла. Оптичний резонатор з активним елементом розташований в захисній оболонці 3, на одному кінці якої закріплено роз'єднувач для кабелів високої напруги та напруги розжарення. Вихід лазерного випромінювання здійснюється з боку напівпрозорого плоского дзеркала 6.

Для живлення розрядної трубки використовується електронний стабілізатор СПБ-5. На його передній панелі розташовані: вимірювальний прилад «Ток навантаження», тумблер «Сеть», сигнальна лампочка, ручка потенціометра «Регулятор тока навантаження», кнопка «Поджиг». На задній стінці блока знаходяться: перемикач напруги живлення, роз'єднувач живлення лазера, клема — «Земля», шнур живлення. Лазер ЛГ-56 працює на довжині хвилі 632,8 нм і дає випромінювання потужністю не менше 2 мВт. Незважаючи на невелику вихідну потужність, яскравість лазерного променя на кілька порядків більша за яскравість звичайної електричної лампи розжарювання. Тому при роботі з лазером слід бути обережним, виконувати правила техніки безпеки. Однією з основних особливостей лазерів є малий кут розходження пучка. Якщо пучок має форму конуса, то тілесний кут можна визначити, ви-

мірявши відповідний плоский кут за формулою

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos(\omega/2)). \quad (4)$$

При умові $\omega < 60^\circ$ зв'язок між тілесним і плоским кутами з достатньою точністю виражається формулою

$$\Omega = (\pi/4) \omega^2, \quad (5)$$

де ω — плоский кут, рад. Кут ω можна виміряти за схемою рис. 155, за якою

$$\omega = (D - d)/(L - l). \quad (6)$$

Порядок виконання роботи

I. Виміряти кут розходження пучка лазерного випромінювання.

1. Підготувати лазер до виконання роботи, для чого перевірити відсутність механічних пошкоджень кабеля та шнура живлення блока СПБ-5, якість заземлення. Тумблер «Сеть» перевести в нижнє положення, ручку «Регулятор тока навантаження» — у крайнє ліве положення. Впевнитись у міцності закріплення лазера на оптичній лаві.

2. Увімкнути прилад, дотримуючись такого порядку:

- увімкнути вилку шнура живлення СПБ-5 у мережу 220 В;
- перевести тумблер «Сеть» у верхнє положення (при цьому спалахне сигнальна лампочка, що свідчить про подачу напруги 1500 В на вихід СПБ-5);
- прогріти лампи стабілізатора та газорозрядну трубку протягом 3—5 хв;
- поставити ручку «Регулятор тока навантаження» в середнє положення;
- здійснити запалення газорозрядної трубки, натиснувши кнопку «Поджиг»;

е) ручкою «Регулятор тока навантаження» встановити стрілку вимірювального приладу на відмічену позначку шкали (ця позначка відповідає максимальній вихідній потужності випромінювання).

3. Закріпити на екрані міліметровий папір і виміряти діаметр плями D та відстань L . Перемістити екран на відстань 0,4—0,5 м від лазера і також виміряти діаметр d та відстань l . За формулами (5), (6) обчислити тілесний кут лазерного пучка.

II. Дослідити поляризацію, інтерференцію та дифракцію лазерного випромінювання.

1. Встановити на оптичній лаві між лазером та екраном поляроїд. Обертанням поляроїда домогтись мінімальної освітленості на екрані. Це свідчить про лінійну поляризацію випромінювання лазера. Визначити напрям площини поляризації випромінювання (напрямок площини поляризації поляроїда задано).

2. Встановити на оптичній лаві екран, в центрі якого закріплено короткофокусну лінзу. Розбіжний пучок випромінювання спрямувати на поверхню товстої (5—10 мм) скляної пластинки. Невеликими переміщеннями екрана з лінзою домогтись чіткої інтерференційної картини на екрані у відбитому від пластинки світлі. Проаналізувати одержану картину.

3. Встановити на оптичній лаві дифракційну решітку і спрямувати на неї випромінювання лазера. Дістати на екрані дифракційну картину. За формулою $d = m\lambda/x_m$ (робота 19) обчислити період дифракційної решітки.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються спонтанне та індуковане випромінювання?
2. Чому в лазерах не використовується дворівнева схема?
3. При яких умовах відбувається генерація світла в активному середовищі?
4. Які переваги мають газові лазери?
5. У чому полягають переваги лазерного випромінювання порівняно з іншими видами випромінювання?

28. Вивчення основ явища люмінесценції [22, 29, 30]

Прилади і матеріали: 1) електронний осцилограф С1—1; 2) два фотопомножувачі ФЭУ-29; 3) високовольтні випрямлячі ВСВ-2; 4) магазин опорів; 5) батарея ємностей; 6) освітлювач ОИ-18; 7) електрична лампа 6,3 В; 8) регулятор напруги РНШ-250; 9) електричний двигун СД-09М; 10) скляна пластинка з люмінофором; 11) набір світлофільтрів.

Теоретичні відомості та опис приладів

Для генерування випромінювання в оптичному діапазоні використовується явище люмінесценції. Люмінесцентне світіння речовин збуджується за рахунок будь-якого виду енергії, крім внутрішньої енергії. Під дією світла, рентгенівського випромінювання, потоків різноманітних частинок, хімічних реакцій, електричного струму та інших збудників теплова рівновага порушується і частинки речовини переходять з нижніх енергетичних станів у верхні. Внаслідок цього на деяких збуджених рівнях енергії нагромаджується більша, порівняно з рівноважним станом, кількість частинок. Тому поряд з тепловим випромінюванням з'являється додаткове світіння (надлишкове над тепловим) — люмінесценція.

Згідно з означенням С. І. Вавилова, *люмінесценція* є світіння тіла, надлишкове над тепловим того ж самого тіла в даній області спектра, при даній температурі, якщо це випромінювання має скінченну тривалість (тобто не припиняється відразу після усунення причини, яка його викликала), що значно перевищує період світлових коливань. Відмінність між тепловим випромінюванням і люмінесценцією полягає в тому, що енергія, поглинута речовиною, іде не на збільшення внутрішньої енергії, а на збільшення потенціальної енергії, яка, не переходячи у теплові коливання атомів, частково або повністю випускається. Речовина, що поглинає енергію, не взаємодіє або слабо взаємодіє з навколишнім середовищем.

Після припинення дії зовнішнього збудника люмінесценція згасає протягом деякого часу τ — часу збудженого стану. Залежно від тривалості світіння люмінесценцію умовно поділяють на *флуоресценцію* ($\tau < 10^{-8}$ с) та *фосфоресценцію* ($\tau > 10^{-8}$ с). Ця характеристика люмінесценції саме і відрізняє її від відбивання, розсіювання світла, гальмівного світіння заряджених частинок, вимушеного випромінювання.

Вивчення люмінесценції дає змогу дістати значну інформацію про структуру твердих тіл, розподіл випускаючих центрів у кристалічній решітці, властивості молекулярних зв'язків, здійснити якісний та кількісний хімічний аналізи. Найбільшого поширення в науці і техніці набула *фотолюмінесценція*. Для її характеристики користуються поняттями спектра збудження і спектра люмінесценції. За основним законом фотолюмінесценції — законом Стокса — Ломмеля — спектр випромінювання люмінофорів та його максимум зсунуті порівняно із спектром збудження та його максимумом у сторону довгих хвиль. З цього випливає, що випромінювання у видимій частині оптичного спектра можна дістати, опромінюючи люмінофори ультрафіолетовим випромінюванням. Спектри збудження і спектри люмінесценції є дзеркально-симетричними відносно прямої, що проходить перпендикулярно до осі частоти через точки перетину кривих обох спектрів. Дослідження цих спектрів показали, що дзеркальна симетрія їх існує для молекул з однаковою будовою систем енергетичних рівнів нормального та збудженого станів. Відповідно відхилення від симетричного розташування спектрів свідчить про характер відхилень у структурі енергетичних рівнів та ймовірностей переходів між ними.

Для кількісної характеристики явища люмінесценції введено поняття квантового та енергетичного виходів. *Квантовий вихід* $\eta_{\text{кв}}$ визначається відношенням кількості $N_{\text{л}}$ фотонів, які випускаються речовиною, до загальної кількості поглинутих $N_{\text{п}}$ фотонів за той самий проміжок часу і при незмінних зовнішніх умовах:

$$\eta_{\text{кв}} = N_{\text{л}}/N_{\text{п}}. \quad (1)$$

Квантовий вихід істотно залежить від частоти падаючих квантів і може набувати значень більше і менше одиниці.

Енергетичний вихід люмінесценції визначається відношенням потужності люмінесцентного випромінювання до потужності падаючого випромінювання:

$$\eta_{\text{е}} = E_{\text{л}}/E_{\text{п}}. \quad (2)$$

Припускаючи, що спектр випромінювання не залежить від частоти падаючого світла, дістанемо з (1) і (2):

$$\eta_{\text{е}} = N_{\text{л}}h\nu_{\text{л}}/N_{\text{п}}h\nu_{\text{п}} = \eta_{\text{кв}} (\nu_{\text{л}}/\nu_{\text{п}}).$$

У переважній більшості випадків використання явища люмінесценції збудження молекул та випромінювання ними випромінювання відбувається незалежно одне від одного. У зв'язку з цим встановлюється закон згасання люмінесцентного світіння з часом при умові спонтанного світіння:

$$I = I_0 e^{-t/\tau},$$

де I — інтенсивність випромінювання в довільний момент часу; I_0 — інтенсивність випромінювання у початковий ($t = 0$) момент часу; τ — час збудженого стану молекули люмінофора. Експериментально τ можна визначити із графічної залежності $\ln I$ від t за тангенсом кута нахилу прямої до осі часу. Установка для визначення τ складається за схемою рис. 156. До неї входять блок освітлення та блок реєстрації. Блок освітлення змонтовано всередині захисного металевих кожуха.

В ньому знаходяться: освітлювач ОИ-18 з ртутною лампою, електродвигун ED , на осі якого закріплено диск D з чотирма отворами, лампа розжарювання L та регулятор напруги РНШ-250. Реєструючий блок складається з: двох фотопомножувачів ФЭУ-29, живлення яких здійснюється від випрямлячів ВСВ-2; електронного осцилографа СІ-1, магазину опорів R , батареї конденсаторів C . Якщо привести в обертання диск D , то світловий потік від ртутної лампи через отвори у диску буде періодично потрапляти через фільтр Φ_2 на люмінофор ЛФ. Фільтр Φ_2 виділяє ультрафіолетову частину спектра ртутної

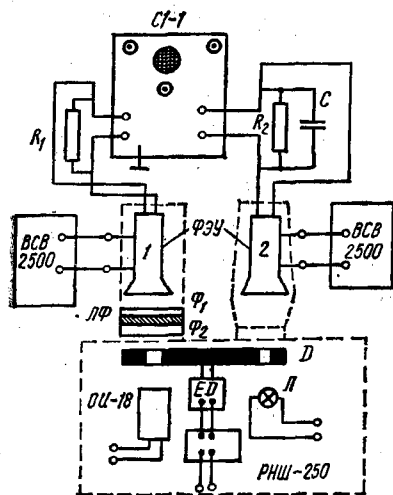


Рис. 156

лампи, а фільтр Φ_1 пропускає лише люмінесцентне випромінювання люмінофора. При попаданні люмінесцентного випромінювання на фотокатод ФЭУ (1) у ньому виникає струм i_1 , пропорційний інтенсивності світіння:

$$i_1 = k_1 I.$$

Струм фотопомножувача ФЭУ (1) створює на опорі R_1 спад напруги U_1 :

$$U_1 = k_1 I R_1 = k_1 I_0 R_1 e^{-t/\tau},$$

$$U_1 = U_{01} e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

де U_0 — спад напруги в початковий момент часу. Напруга U_1 подається на вертикально відхиляючі пластини осцилографа. Для синхронної розгортки напруги U_1 в часі використовується друга частина реєстру-

ючого блока. При обертанні диска через симетрично розташовані отвори на фотопомножувач ФЭУ (2) одночасно із світловим потоком від ртутної лампи падає потік світла від лампи L . Він викликає у ФЭУ (2) струм, який заряджає конденсатор C . Після перекриття світлового потоку конденсатор починає розряджатись через опір R_2 . На опорі створюється спад напруги, що змінюється за певним законом:

$$U_2 = U_{02} e^{-t/R_2 C}. \quad (4)$$

Ця напруга подається на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа. Виключивши з рівнянь (3) і (4) параметр t , дістанемо рівняння кривої затухання люмінесценції, зображеної на екрані осцилографа:

$$U_1 = U_{01} \exp \left[\frac{R_2 C}{\tau} \ln \frac{U_2}{U_{01}} \right] = U_{01} \left[\exp \left(\ln \frac{U_2}{U_{01}} \right) \right]^{\frac{R_2 C}{\tau}} =$$

$$= U_{01} \left(\frac{U_2}{U_{02}} \right)^{\frac{R_2 C}{\tau}}.$$

Якщо задовольнити умову

$$R_2 C = \tau, \quad (5)$$

то дістанемо рівняння прямої:

$$U_1 = U_{01} (U_2 / U_{02}) = k_2 U_2.$$

Отже, для даного люмінофора визначення часу збудженого стану зводиться до виконання умови (5).

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку згідно з схемою рис. 156. Пересвідчитись, чи надійно заземлені прилади.
2. Увімкнути осцилограф. Перемикач діапазону частот розгортки поставити в положення «Викл».
3. Увімкнути регулятор напруги РНШ-250; подавши напругу 150—200 В на двигун, пересвідчитись у рівномірному обертанні диска.
4. Подати напругу живлення на фотопомножувачі від випрямлячів ВСВ-2. При вмиканні високої напруги на панелі випрямляча спалахне червона лампочка. Потрібне значення напруги треба встановити поступово, спочатку перемикачем «Грубо», а потім — «Плавно».
5. Підбираючи значення опору R_2 та ємності C за допомогою магазину та батареї, дістати на екрані осцилографа пряму, яка перетинає перший та третій квадранти. Зафіксувати значення R і C та за формулою (5) обчислити значення τ .

Контрольні запитання

1. Що таке люмінесценція та якими методами вона викликається?
2. Поясніть межі зміни значень квантового виходу люмінесценції.
3. Сформулюйте основні закони люмінесцентного світіння.
4. Як пов'язаний час збудженого стану τ з властивостями люмінофора та зовнішніми умовами?

29. Дослідження ефекту Холла в напівпровідниках [9, 29, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) зразок германію з контактною системою; 2) високоомний потенціометр Р-307; 3) дзеркальний гальванометр М-21; 4) електромагніт з полюсними наконечниками; 5) випрямляч ВСА-5; 6) мілівольтметр М119; 7) нормальний елемент Вестона; 8) батарея акумуляторів 6НКН-10; 9) два магазини опорів; 10) міліамперметр МВА-47/5.

Теоретичні відомості та опис приладів

Ефектом Холла називається явище утворення різниці потенціалів та поперечного електричного поля в металі або напівпровіднику із струмом, якщо вони розташовані в магнітному полі, перпендикулярному до напрямку струму. Під дією сили Лоренца заряди, напрямлений рух яких зумовлює струм у металі або напівпровіднику, відхиляються до однієї з його граней і заряджають її. Дослідження ефекту Холла дає змогу визначити деякі параметри кристала, які характеризують його електричні властивості, а для напівпровідників — тип провідності. Розглянемо кристал напівпровідника (рис. 157). Напрямок струму крізь зразок протилежний напрямку швидкості руху електронів

(для позитивних зарядів вони збігаються). Під дією сили Лоренца $\vec{F}_L = e[\vec{v} \cdot \vec{B}]$ електрони відхиляються до верхньої грані зразка і заряджають її негативно. На протилежній грані залишається некомпенсований позитивний заряд кристалічної решітки. Внаслідок такого розділення зарядів виникає електричне поле напруженістю \vec{E}_x . У випадку $\vec{B} = \text{const}$ розподіл зарядів відбувається до настання рівноваги, яка характеризується рівністю

$$evB = eE_x \quad \text{або} \quad E_x = vB.$$

Якщо геометричні розміри зразка задовольняють умову $l > a \gg b$, то електричне поле E_x однорідне. Тоді різниця потенціалів між верхньою та нижньою гранями

$$U_x = E_x a = vBa. \quad (1)$$

З електронної теорії провідності металів відомо, що сила струму

$$I = evnab, \quad (2)$$

де n — концентрація електронів, м^{-3} . Підставляючи значення v з (2) в (1), дістанемо:

$$U_x = (1/en) IB/b = R_x (IB/b), \quad (3)$$

де $R_x = 1/en$ — стала Холла.

З формули (3) видно, що знак сталої Холла збігається із знаком заряду e носіїв струму. Тому на основі визначення сталої Холла для напівпровідників можна установити тип провідності: при електронній $R < 0$, при дірковій $R > 0$. Якщо у напівпровіднику одночасно існують обидва типи провідності, то за знаком сталої Холла можна зробити висновок про переважаючий тип провідності. Виникнення холлівської е. р. с. у домішковому напівпровіднику зумовлене різною рухливістю електронів і дірок. Для домішкового напівпровідника з двома типами провідності класична електронна теорія дає такий вираз для сталої Холла:

$$R_x = (3\pi/8e) (n_- u_-^2 - n_+ u_+^2) / (n_- u_- + n_+ u_+)^2, \quad (4)$$

де n_- , n_+ — відповідно концентрації електронів і дірок; u_- , u_+ — їх рухливості. Коефіцієнт $3\pi/8$ з'являється при врахуванні розподілу носіїв струму за швидкостями. У випадку значної переваги концентрації носіїв певного знаку рівняння (4) можна записати для електронів:

$$R_x = -(3\pi/8) (1/n_- e), \quad (5)$$

для дірок:

$$R_x = (3\pi/8) (1/n_+ e). \quad (6)$$

Вирази (5), (6) дають змогу при експериментальному визначенні R_x обчислити концентрації n_+ , n_- . Якщо, крім того, відома питома електропровідність речовини σ , то можна підрахувати рухливості u_+ , u_- носіїв заряду. Оскільки $|R_x| = 1/en$, $\sigma = enu$, то $|R_x \sigma| = u$.

Установка для вимірювання холлівської різниці потенціалів (рис. 158) складається з германієвого зразка із системою контактів, електромагніта, високоомного потенціометра з гальванометром, випрямляча для живлення електромагніта. Германієвий зразок закріплено між двома пластинами з органічного скла. До нього підводяться контакти 1 — 5. До контактів 1 і 5 підводиться зовнішня напруга для створення струму крізь зразок. Контакти 3 — 4 дають можливість вимірювати холлівську е. р. с., 2 — 3 — питомий опір. Струм через зразок не повинен перевищувати 1 мА

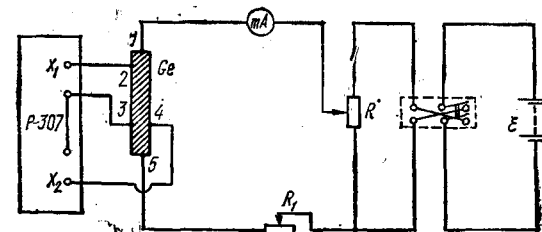


Рис. 158

Магнітне поле створюється у проміжку між полюсними наконечниками, які закріплені на осердях двох котушок. В цей проміжок вводиться досліджуваний зразок після вимірювання магнітного потоку у проміжку. Магнітний потік вимірюють за допомогою мілівеберметра М119. Це прилад магнітоелектричної системи, в якому немає спеціального пристрою для створення протидіючого механічного моменту при повороті рамки. Тому після відхилення стрілка приладу не повертається на нульову поділку шкали, а залишається у положенні, якого досягла при даному вимірюванні. Для її повернення у початкове положення в приладі є спеціальний коректор. Прилад працює разом із зовнішньою вимірювальною котушкою, яка вноситься у магнітне поле. Розміри і форма вимірювальної котушки залежать від конкретних умов вимірювання.

При внесенні вимірювальної котушки у магнітне поле в ній виникає індукційний струм, пропорційний значенню магнітного потоку (при незмінних параметрах котушки) у проміжку. Значення індукції поля обчислюють за формулою

$$B = (4k_\Phi / (\pi d^2 N)) \alpha,$$

де k_Φ — ціна поділки мілівеберметра, що дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ Вб/под; d — діаметр вимірювальної котушки; N — кількість витків котушки; α — кількість поділок при відхиленні стрілки.

Вимірювання холлівської е. р. с. та питомої електропровідності здійснюється за допомогою високоомного потенціометра Р-307. Він працює за містковою схемою, а е. р. с. вимірюється компенсаційним методом.

У даній роботі вимірюються холлівська е. р. с. та рухливість носіїв заряду германію. Це елемент четвертої групи четвертого періоду періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва, порядковий номер 32, атомна маса 72,59, густина $5,35 \cdot 10^3$ кг/м³.

Германій за зовнішнім виглядом нагадує метал, але він дуже крихкий, не піддається гарячій і холодній обробці. Кристалічна решітка германію належить до кубічної системи. Структура решітки алмазоподібна.

Порядок виконання роботи

1. Перевірити з'єднання всіх елементів установки. Поставити всі тумблери у положення «Викл».

2. Увімкнувши випрямляч ВСА-5, підготувати до вимірювання мілівеберметр. Перевести перемикач в положення «Коректор» і встановити стрілку приладу на нульову поділку шкали. Ввести в міжполюсний проміжок вимірювальну котушку, розташувавши її паралельно поверхні одного з полюсів. Встановити перемикач у положення «Вимірювання». Подати на котушки електромагніта напругу. Швидко викинути вимірювальну котушку з міжполюсного проміжку і зафіксувати покази по шкалі мілівеберметра та значення струму в котушках електромагніта. Якщо стрілка відхиляється вліво від нуля, треба повернути вимірювальну котушку на 180° або змінити напрям струму в котушках електромагніта і, провівши підготовчі операції, знов виміряти значення індукції поля. Вимірювання індукції зробити для трьох визначень струму в котушках електромагніта.

3. Ознайомившись з порядком роботи на Р-307, приступити до вимірювання холлівської е. р. с. Для цього ввести у міжполюсний проміжок оправу із зразком германію, за допомогою реостатів R і R_1 встановити номінальний струм через зразок.

4. Встановити на випрямлячі ВСА-5 струм, який відповідає першому вимірюваному значенню індукції магнітного поля, і визначити U_x . Не змінюючи струм через зразок, повторити вимірювання U_x ще для двох значень струму електромагніта; за формулою (3) обчислити значення сталої Холла та за (5) — концентрацію основних носіїв струму.

5. За допомогою потенціометра Р-307 провести вимірювання спаду напруги U_σ між контактами 2—3 при встановленому значенні сили струму I_{sp} . Тоді питома електропровідність обчислюється за формулою

$$\sigma = (e/ab) (I_{sp}/U_\sigma).$$

Значення параметрів I , a , b одержати у керівника занять. Діставши після обчислень значення R_H та σ , визначити рухливість основних носіїв струму в германії.

Контрольні запитання

1. Які особливості зонної структури провідників, напівпровідників та діелектриків?
2. Як пояснити ефект Холла у випадку біполярної провідності кристала?
3. Який фізичний зміст сталої Холла?
4. Вимірювання якої величини у даній роботі вносить найбільшу похибку і чому?

30. Дослідження фотоелектричних властивостей напівпровідників [29, 9, заводські інструкції]

Вирування електронів за рахунок енергії поглинутого випромінювання з поверхні твердого тіла називається зовнішнім фотоелектом. Він може спостерігатись на металах, напівпровідниках і діелектриках.

В напівпровідниках можливий *внутрішній фотоелект*, який полягає у виникненні вільної пари електрон — дірка внаслідок поглинання атомом енергії фотона, достатньої для переведення електрона з валентної зони у зону провідності. Додаткова провідність, придбана напівпровідником при опроміненні його світлом, називається фотопровідністю. Основна ж провідність, зумовлена тепловим збудженням носіїв заряду, називається темною провідністю, тому що має місце при затемненні напівпровідника. Розрізняють *власну* і *домішкову фотопровідність* в залежності від збудження власних або домішкових носіїв заряду. Фотопровідність напівпровідників типу PbS , CdS , $CdSe$, $InSb$, Bi_2S_3 пов'язана з електронними переходами між зоною провідності і валентною зоною, тобто для них характерна власна фотопровідність. Фотопровідність германію з домішками міді, цинку, золота, а також сплави германію та кремнію, леговані Sb , Te , Au , Zn , характеризуються переходами між домішковими рівнями та зоною провідності. Оскільки для збудження носіїв з домішкових рівнів потрібна енергія, менша за ширину забороненої зони, то такі напівпровідники добре проявляють фотопровідність при низьких температурах. Для спостереження фотопровідності напівпровідників (фоторезисторів) потрібно скласти електричне коло із стороннім джерелом сталої напруги. Але при деяких умовах явище внутрішнього фотоелекту може привести до виникнення різниці потенціалів між різними точками напівпровідника, тобто виникає фото-е. р. с.

У такому випадку, коли виконується умова

$$h\nu \geq E_g \text{ — для власних напівпровідників і}$$

$$h\nu \geq E_n \text{ — для домішкових напівпровідників}$$

(E_g — ширина забороненої зони; E_n — енергія активації домішкових атомів), то в освітленому напівпровіднику з'являється надлишкова (над темною) концентрація Δn — електронів і Δp — дірок. Одночасно з освітленням в об'ємі напівпровідника виникне градієнт концентрації носіїв заряду. Він викликає дифузію вільних носіїв від освітлених місць до неосвітлених. Оскільки рухливість електронів і дірок різна, при їх дифузії виникає електричне поле. Через деякий час після початку освітлення та настання *динамічної рівноваги* між дифузійним потоком носіїв та потоком під дією поля освітлена поверхня буде заряджена позитивно, а неосвітлена — негативно. При вимірюванні утвореної різниці потенціалів на її значення сильно впливає контактна різниця потенціалів напівпровідник — метал. Тому фото-е. р. с. в однорідному напівпровіднику практично не можна не тільки використати, а навіть точно виміряти. Дещо інший та більш істотний для практичного використання механізм утворення фото-е. р. с. має місце у p - n переходах. Прилади, які засновані на явищі внутрішнього фотоелекту у p - n переході, називаються фотоелементами із запірним шаром або *вентильними фотоелементами*. Для їх виготовлення

найчастіше використовують такі матеріали, як Se, Si, Ge, CdS, GaAs, InP, GaP. Вентильні фотоелементи, крім прямого перетворення енергії електромагнітного випромінювання в електричну, здатні реєструвати і напрям променистого потоку.

1. Визначення основних характеристик напівпровідникового фоторезистора

Прилади і матеріали: 1) фоторезистор ФС-К1; 2) оптична лава; 3) освітлювач ОИ-31; 4) високоомний потенціометр ППТВ-1; 5) дзеркальний гальванометр М-21; 6) 5 резисторів по 100 кОм; 7) локсметр Ю-16; 8) нормальний елемент Вестона; 9) батарея акумуляторів 4НКН-10; 10) перемикач-комутатор.

Теоретичні відомості та опис установки

Зміна провідності фоторезистора при дії на нього оптичного випромінювання визначається формулою

$$\Delta\sigma = eN_{np}(u_n\tau_n + u_p\tau_p),$$

де N_{np} — кількість електронно-діркових пар, $\text{с}^{-1}\text{м}^{-3}$; u_n , u_p — рухливість електронів і дірок, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; τ_n , τ_p — час життя електрона і дірки, с.

З останньої рівності видно, що кінетика фотопровідності визначається часом життя вільних носіїв заряду. Внаслідок явища рекомбінації концентрація надлишкових носіїв спадає за законом

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}.$$

За тим самим законом спадає і фотопровідність після припинення дії випромінювання. Тобто чим більше значення τ_n (τ_p), тим більш інерційний фоторезистор. Водночас довше життя надлишкових носіїв заряду зумовлює фоточутливість напівпровідника. Для найбільш поширених фоторезисторів τ набував значення від $2 \cdot 10^{-2}$ с до $4 \cdot 10^{-5}$ с. Врахування цих особливостей фоторезисторів спричинює виготовлення значної кількості їх різноманітних типів і конструкцій. В електричному колі з фоторезистором проходить струм

$$I_\phi = U_\phi / R_\phi, \quad (1)$$

де U_ϕ — спад напруги на фоторезисторі; R_ϕ — його опір при освітленні.

При невеликих напругах на фоторезисторі, сталих температурі та освітленості їх вольт-амперна характеристика має лінійний характер. Відхилення від закону Ома настають при напругах, близьких до граничної для даного фоторезистора.

Значення фотоструму I_ϕ залежить від інтенсивності падаючого на фоторезистор випромінювання та довжини хвилі. Виходячи з механізму утворення фотоструму, можна стверджувати, що він є нелінійною функцією світлового потоку. Ця залежність $I_\phi = f(\Phi)$ називається *світловою характеристикою фоторезистора*. В загальному випадку, при різних співвідношеннях між концентрацією основних носіїв заряду та фотоносіїв, фотопровідність напівпровідників так залежить від падаючого світлового потоку:

$$\sigma_\phi = c\Phi^a, \quad (2)$$

де $c = \text{const}$; $0 < a < 1$.

Якщо в законі Ома (1) опір фоторезистора виразити через питому електропровідність і скористатись виразом (2), то дістанемо:

$$I_\phi = c_1 \Phi^a U_\phi, \quad (3)$$

де c_1 — стала для даного фоторезистора. Однією з важливих характеристик фоторезистора є *інтегральна чутливість*

$$\gamma = I_\phi / \Phi.$$

З урахуванням (3)

$$\gamma = c_1 \Phi^a U_\phi / \Phi = c_1 U_\phi \Phi^{a-1}.$$

З цього рівняння видно, що інтегральна чутливість не є величиною сталою: вона зростає із зростанням U_ϕ і зменшується із зростанням

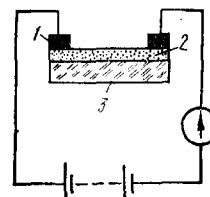


Рис. 159

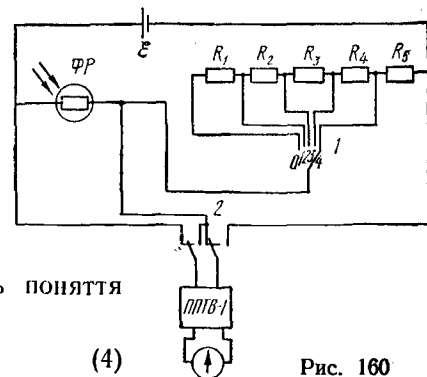


Рис. 160

Φ ($a < 1$). Враховуючи це, вводять поняття *питомої інтегральної чутливості*:

$$\gamma_0 = I_\phi / \Phi U_\phi.$$

(4)

Чутливість фоторезисторів до монохроматичного випромінювання неоднакова для різних довжин хвиль. Залежність чутливості фоторезистора від довжини хвилі називається *спектральною характеристикою*. Спектральні характеристики різних фоторезисторів надто сильно відрізняються одна від одної. Для різних ділянок оптичного діапазону випромінювання використовують різні типи фоторезисторів. Для виготовлення фоторезисторів використовуються сірчані та селенові сполуки свинцю, кадмію, вісмуту. Червона межа фотопровідності цих сполук знаходиться в інфрачервоній ділянці спектра.

Конструкційно фоторезистори різних типів дуже мало відрізняються один від одного. Основним елементом їх є тонкий шар напівпровідника 2 (рис. 159), нанесений на ізолюючу основу 3, наприклад, вакуумним напиленням. По краях шару напівпровідника наноситься металевий контакт 1. В окремих випадках фоторезистор виготовляють вирізуванням тонкої пластинки з монокристалу. Виготовлений певним способом фоторезистор вміщують у захисний корпус з віконцем і контактними ніжками та елементами охолодження (радіатори). У даній роботі для визначення характеристики фоторезистора використовується установка, схему якої наведено на рис. 160. На оптичній лаві у спеціальному тримачі закріплено фоторезистор ФР (типу ФС-К1) з площею світлочутливого шару $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. В електричному колі послідовно з фоторезистором увімкнено панельку з набором керамічних резисторів по 100 кОм, які перемикачем 1 по черзі підключаються

до кола, збільшуючи його загальний опір. Таким чином, змінюючи опір кола, можна дістати різні значення спаду напруг U_Φ . Робота фоторезистора в електричних схемах автоматизації та керування залежить від кратності зміни опору

$$k = R_c/R_r, \quad (5)$$

де R_r — темновий опір фоторезистора; R_c — опір при даному потоці Φ та сталому значенні U_Φ .

Зміну світлового потоку, який падає на світлочутливий шар, здійснюють зміною відстані між фоторезистором і джерелом світла.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись за інструкцією з порядком роботи на потенціометрі ППТВ-1.

2. Увімкнути освітлення шкали гальванометра (рис. 160) та виміряти темновий струм фоторезистора. Для цього поставити перемикач I у положення «1», виміряти по черзі спади напруг на опорах R_1 і фоторезисторі U_R і U_Φ . Обчислити R_r .

3. Увімкнути живлення джерела світла та освітити фоторезистор. При сталому потоці Φ , змінюючи положення перемикача I , для кожного значення опору виміряти U_R , U_Φ . Обчислити значення I_Φ та побудувати вольт-амперну характеристику $I_\Phi = f(U_\Phi)$. Повторити вимірювання для збільшеного світлового потоку. Порівняти та пояснити одержані характеристики.

4. Поставити перемикач I у положення «3». Змінюючи значення світлового потоку Φ , знову виміряти U_R і U_Φ . Для кожного значення Φ обчислити I_Φ та побудувати світлову характеристику. Значення потоку Φ обчислюють, знаючи площу S фоторезистора та освітленість, виміряну люксметром.

5. Обчислити за формулою (5) кратність зміни опору, діставши значення R_c для максимального світлового потоку Φ .

6. За формулою (4) обчислити питому інтегральну чутливість.

Контрольні запитання

1. Який механізм фотопровідності домішкових фоторезисторів?
2. Які переваги і недоліки фоторезисторів?
3. Яке практичне значення мають характеристики фоторезистора?
4. Чим відрізняються вольт-амперні характеристики фоторезистора і фотоелемента із зовнішнім фотоэффектом?

II. Визначення основних характеристик фотоелемента

Прилади і матеріали: 1) вентильний фотоелемент ФСС-УЗ; 2) освітлювач ОИ-31; 3) випрямляч ВС4-12; 4) гальванометр М-122; 5) міліамперметр М-254; 6) мікроамперметр М-94; 7) магазин опорів Р-32; 8) магазин опорів МСР-60М; 9) акумулятор НКН-10.

Теоретичні відомості та опис установки

Виникнення фото-е. р. с. у p - n переході пов'язано з дією контактного електричного поля. У неосвітленому p - n переході за рахунок дифузії основних носіїв заряду виникає внутрішнє електричне поле

\vec{E}_0 (рис. 161), яке зумовлює рівність нулю повного струму через перехід у рівноважному стані. Якщо освітити p -область, у ній виникнуть пари електрон — дірка. При умові, що товщина δ p -області не більша за довжину L дифузійного пробігу носіїв (рис. 162), вони досягають p - n переходу.

Для утворених світлом надлишкових електронів p - n перехід не є потенціальним бар'єром. Вони переходять у n -область, займаючи вільні рівні зони провідності. Надлишкові дірки залишаються у p -області, оскільки p - n перехід є для них потенціальним бар'єром (діркам енергетично вигідно переходити з низьких на більш високі енергетичні рівні). Таким чином, p - n перехід просторово розділяє надлишкові

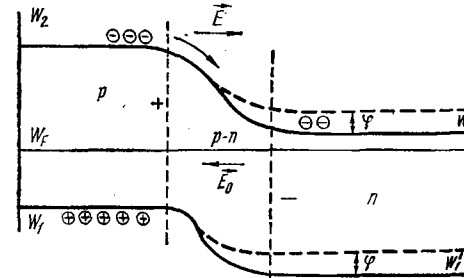


Рис. 161

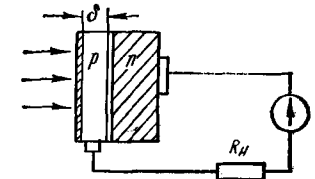


Рис. 162

електрони і дірки. В результаті цього у n -області виникає надлишковий негативний заряд, а в p -області — некомпенсований позитивний заряд. Тобто в p - n переході виникає електричне поле \vec{E} , напрямлене протилежно власному \vec{E}_0 . Висота бар'єра знижується на величину ϕ . Це приводить до переходу електронів із зони провідності n -області у p -область, а дірок — із зони валентних рівнів p -області у таку ж зону n -області. Тоді сумарний потік електронів з p у n -область зменшиться, а потік дірок зросте. Ці потоки за своїм характером нагадують прямий струм через p - n перехід. При цьому на p - n переході встановлюється стаціонарна різниця потенціалів завдяки некомпенсованому заряду протилежних знаків у p - і n -областях, утвореним під дією світла. Ця різниця потенціалів і проявляється як фото-е. р. с. Замикання електродів на зовнішнє навантаження R_H приводить до виникнення струму I_Φ , значення якого при $R_H = \text{const}$ залежить від інтенсивності світлового потоку Φ . Залежність $I_\Phi = f(\Phi)$ називається *світловою характеристикою фотоелемента*. Нелінійність цієї характеристики зростає із зростанням Φ при $R_H = \text{const}$ та швидко проявляється при великих R_H .

Серед різноманітних типів фотоелементів добрими фізико-технічними характеристиками відрізняються *сірчисто-срібні* фотоелементи типу ФЭСС-У. Вони мають досить широку (від 0,4 до 1,4 мкм) область спектральної чутливості з максимумом у межах 0,8—0,9 мкм, стабільні в роботі. Але поряд з цим лінійність світлової характеристики для них простежується в обмеженому інтервалі освітленості до 100—150 лк. Крім того, при великих освітленостях у них відбуваються необоротні процеси, які виводять фотоелемент з ладу. Залежно від типу

фотоелемента (ФЭСС-У2, ФЭСС-У3, ФЭСС-У10) опір зовнішнього навантаження мусить бути в межах 10—50 кОм. Різні типи фотоелементів із запірним шаром відрізняються спектральними та інтегральними чутливостями. Майже всі фотоелементи мають високу чутливість у видимій частині спектра. Для ряду практичних задач важливою є *інтегральна чутливість* — відношення струму короткого замикання ($R_n = 0$) до світлового потоку при опроміненні фотоелемента від еталонного джерела (лампа розжарювання потужністю 100 Вт з вольфрамовою ниткою і кольоровою температурою 2850 К). У роботі пропонується визначити інтегральну чутливість фотоелемента, користуючись установкою, зібраною за схемою рис. 163.

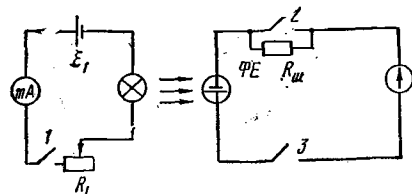


Рис. 163

За означенням інтегральна чутливість

$$\alpha = I_{\Phi} / \Phi.$$

При певній відстані r фотоелемента з площею S від лампи з силою світла I інтегральна чутливість

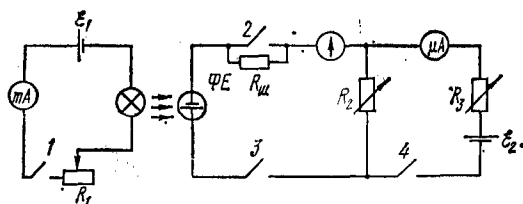
$$\alpha = I_{\Phi} r^2 / IS.$$


Рис. 164

Силу світла лампи розжарювання знаходять за *градуальною кривою* даної лампи (залежність сили світла лампи від сили струму у нитці розжарення). Оскільки фотоелементи найчастіше експлуатуються у пристроях, де використовують видиме випромінювання, то інтегральну чутливість α зручно вимірювати в мікроамперах на люмен (мкА/лм). Вимірювання е. р. с. фотоелемента здійснюють компенсаційним методом (рис. 164) і обчислюють за формулою

$$\mathcal{E} = I_1 R_2. \quad (1)$$

Якщо перемикачі 2 і 3 замкнені, а 4 розімкнений, то спад напруги на R_2 дорівнює фото-е. р. с. При замиканні перемикача 4 на опорі R_2 створюється спад напруги за рахунок струму від джерела \mathcal{E}_2 , увімкненого назустріч фото-е. с. р. Змінюючи R_2 , можна підібрати такий спад напруги, який скомпенсує фото-е. р. с.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку за схемою рис. 163.
2. Закріпити фотоелемент на відстані 0,4—0,5 м від освітлювача. Увімкнути перемикач 1 і освітити фотоелемент. Замкнути перемикач

3 та пересвідчитися, що стрілка гальванометра не зашкалює. Після цього замкнути перемикач 2 і, знаючи ціну поділки гальванометра, підрахувати значення фотоструму.

3. Зафіксувати покази міліамперметра у колі освітлювача та за графіком знайти силу світла лампи.

4. Не змінюючи сили струму через лампу освітлювача, збільшити відстань r до 1 м через 0,1—0,15 м і зробити відповідні вимірювання I_{Φ} . За цими даними обчислити середнє значення інтегральної чутливості фотоелемента та побудувати його світлову характеристику $I_{\Phi} = f(\Phi)$.

5. Доповнити установку приладами за схемою рис. 164.

6. Встановити опір R_2 в середнє положення. Замкнути перемикачі 1 і 3, освітити фотоелемент.

7. Замкнути перемикач 4 і, змінюючи опір R_2 через кожні 10 Ом, пересвідчитися, що стрілка гальванометра повертається у положення рівноваги. У протилежному разі змінити напрям струму через R_2 .

8. Після виконання грубої компенсації схеми замкнути перемикач 2 і точно скомпенсувати схему. Зафіксувати значення опору R_2 та струму по мікроамперметру. Обчислити за цими даними значення е. р. с. (формула (1)). Провести аналогічні вимірювання при п'яти значеннях освітленості фотоелемента. Результати дослідів подати у вигляді графічної залежності фото-е. р. с. від світлового потоку. При виконанні вимірювань перед кожною зміною світлового потоку розмикати перемикач 2.

Контрольні запитання

1. Поясніть механізм виникнення фото-е. р. с.
2. Що таке спектральна чутливість фотоелемента?
3. У чому полягає компенсаційний метод вимірювання е. р. с.?
4. Назвіть галузі практичного використання вентильних фотоелементів.

31. Дослідження лічильника Гейгера—Мюллера [31, 30, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) радіометр ПП-8; 2) блок газових лічильників УГС-1; 3) лічильники Гейгера—Мюллера СИ-7Г, Т-25-БФЛ; 4) свинцева стінка; 5) джерела радіоактивного випромінювання 2П9, 2С0.

Теоретичні відомості та опис установки

Газорозрядні лічильники широко використовуються при реєстрації та вимірюванні іонізуючого випромінювання. Вони різняться конструктивно в залежності від природи випромінювання, а також від призначення установки. Але фізичні явища, що лежать в основі їхньої роботи, та основні конструктивні елементи однакові. Всі вони складаються з циліндричного балона (металевого або скляного), заповненого сумішшю газів (рис. 165). Найбільш поширена суміш на основі аргону з 10 %-ю добавкою органічних сполук, або неон з добавками галогенів. Тиск газу знаходиться у межах $(1,33—2,7) \cdot 10^6$ Па (100—200 мм рт. ст.). Катодом є сам металевий балон або тонкий шар металу, нанесений на

внутрішню поверхню балона, а анодом — тонка металева нитка. Якщо заряджена частинка перетинає лічильник, то вона іонізує газ. Утворені при цьому електрони притягуються до анода і поблизу нього набувають великої енергії, достатньої для додаткової іонізації. Таким чином, кожний електрон на своєму шляху до анода створює певну кількість пар іонів та збуджених атомів. Збуджені атоми випускають фотони, які, бомбардуючи катод, вибивають з нього додаткові електрони. Вони, у свою чергу, рухаючись до анода, знов іонізують газ. Тобто за дуже короткий час (10^{-7} — 10^{-6} с) у розрядному проміжку може відбуватися послідовна серія електронних лавин. Для поглинання фотонів і вводяться домішки інертного газу. Механізм роботи лічильни-

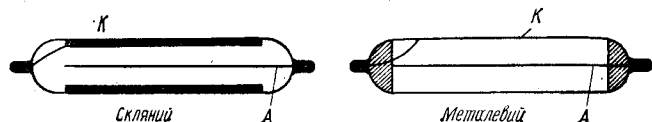


Рис. 165

ка істотно залежить від прикладеної напруги між катодом і анодом. Якщо напруга невелика (немає ударної іонізації), то величина імпульсу струму в колі лічильника пропорційна кількості пар іонів, утворених пролітаючою частинкою, та ємності лічильника. Такий режим роботи називають *режимом іонізаційної камери*. При зростанні напруги поблизу анода, внаслідок великої напруженості поля, відбувається ударна іонізація, яка приводить до газового підсилення. Коефіцієнт газового підсилення k дорівнює відношенню кількості пар іонів, утворених у лавині, до початкової кількості пар, утворених пролітаючою частинкою. При даній напрузі між анодом і катодом кожний первинний електрон викликає лавину з k електронів. Кожна лавина розвивається незалежно від інших, що й зумовлює пропорційне підсилення первинної іонізації незалежно від її величини. Таким чином, значення імпульсу струму у колі лічильника пропорційне енергії пролітаючої частинки. Такий режим називають *режимом пропорційного лічильника*. При дальшому зростанні напруги лічильник переходить у режим самостійного розряду. Величина заряду, створеного внаслідок газового підсилення, а значить, і імпульс струму у колі стають незалежними від початкової іонізації.

Режим самостійного розряду дає змогу зареєструвати пролітаючу частинку навіть при утворенні нею однієї пари іонів. Але він протікає досить довго, і лічильник у цей час не реагує на інші пролітаючі частинки. Застосовуючи спеціальні схеми включення (несамогасний лічильник) або додаючи в об'єм лічильника важкі гази (самогасний лічильник), можна створити умови, при яких самостійний розряд спадає дуже швидко. Отже, попадання зарядженої частинки в об'єм лічильника викликає короткочасний, але досить сильний імпульс струму. Лічильники, які працюють у такому режимі, і називають лічильниками Гейгера — Мюллера. Як правило, у коло лічильника (рис. 166) підмикається досить великий опір (10^{10} — 10^8 Ом). При виникненні розряду (коло замикається) весь спад напруги відбувається на опорі

R , напруга між анодом і катодом лічильника спадає і розряд згасає. Крім того, цей опір впливає і на зростання напруги у розрядному проміжку, в результаті чого об'єм звільняється від позитивних іонів. Час протікання розряду лічильника називають *мертвим часом*. Від нього залежить швидкість реєстрації частинок, або роздільна здатність лічильника. Чим менший мертвий час, тим більшу кількість частинок він зможе зареєструвати. Залежність швидкості лічби частинок (при сталій активності радіоактивного препарату) від напруги на електродах лічильника називають *лічильною характеристикою* (рис. 167). На ділянці ab лічильник працює у перехідному режимі від пропорційного лічильника до гейгерівського. У цій області на-

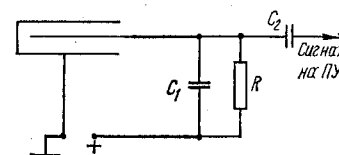


Рис. 166

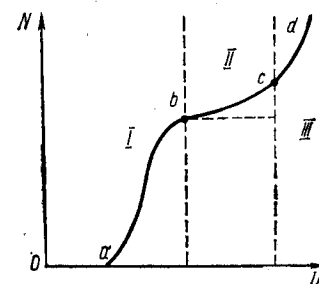


Рис. 167

пруг швидкість лічби швидко зростає. Невелика зміна напруги веде до великої зміни швидкості лічби імпульсів. На ділянці bc швидкість лічби майже не залежить від напруги. Цю ділянку називають *плато характеристики*. Вона включає область робочих напруг. Тут зміна напруги може привести до зміни швидкості лічби не більше ніж на 3—5 %. На ділянці cd (область самостійного розряду) невеликі зміни напруги приводять до появи імпульсів, не пов'язаних із зміною активності радіоактивного препарату. Для забезпечення правильної та стабільної роботи лічильника потрібно вибирати напругу в області плато. Розмір плато є однією з основних характеристик лічильника і для різних типів лічильників перебуває у межах 100—300 В. Для одержання лічильної характеристики лічильника використовують радіометр ПП-8 (рис. 168). Він складається з перелічувального приладу 1 типу ПСТ-100, високовольтного випрямляча ВСВ-2, блока фотопомножувача із змінними головками 3, блока газових лічильників 4 (типу УГС-1). Установка дає змогу зареєструвати і вести лічбу імпульсів, які надходять з датчиків радіоактивних випромінювань, а також періодичних імпульсів з частотою слідування до 10^5 імпульсів/с. На передній панелі приладу ПСТ-100 знаходяться декатронний блок «Счет импульсов» та електронний секундомір, який забезпечує відрахування інтервалів часу 10^3 с. У приладі забезпечується автоматична зупинка секундоміра при нарахуванні обраної кількості імпульсів — 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 або після закінчення інтервалів часу 10, 10^2 , 10^3 с. Середня швидкість лічби імпульсів контролюється за допомогою електровимірювального приладу, шкалу якого проградуєвано в імпульсах за секунду (імпульс/с).

На передній панелі також знаходяться: тумблер вмикання живлення, кнопковий перемикач керування роботою приладу, кнопковий

перемикач діапазонів вимірювання кількості імпульсів та інтервалів часу. Напруга на електроди лічильника подається з випрямляча ВСВ-2, на передній панелі якого є перемикач діапазону напруг «Грубо» та потенціометр «Плавню». Вихідна напруга контролюється вольтметром. Лічильник, закріплений на штативі разом з блоком УГС, знаходиться за свинцевою стінкою, під ним — джерело радіоактивного випромінювання.

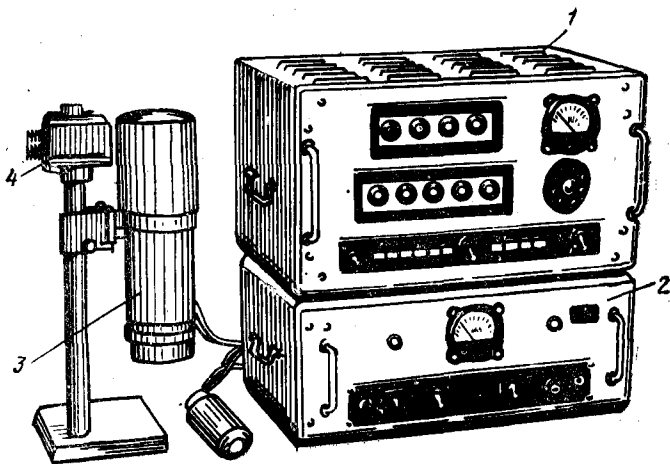


Рис. 168

Роботу з вивчення газового лічильника виконують окремо при реєстрації β -випромінювання (лічильники типу СП-2Б, СБТ-7, СТС-5, СИ-7Г) та α -випромінювання (лічильники типу САТ-8, СТБ-9, Т-25-БФЛ).

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з порядком роботи установки ПП-8 за заводською інструкцією. Пересвідчитись у надійності заземлення установки. Перемикач «Грубо» та потенціометр «Плавню» на ВСВ-2 поставити у крайнє ліве положення.

2. Увімкнути прилад у мережу та після прогрівання його протягом 3—5 хв поставити тумблер «Высок. напр.» у положення «Вкл.»

3. Одержати у лаборанта джерело радіоактивного випромінювання та розмістити його під лічильником.

4. Поступово збільшуючи напругу потенціометром «Плавню», встановити напругу U_z , що відповідає початку реєстрації радіоактивного випромінювання. Напруга на лічильнику встановлюється повільно, тому її значення по шкалі приладу треба знімати після відлічування імпульсів. Напругу змінювати через кожні 25 В.

5. Лічбу імпульсів проводити за інтервал часу 100 с. При кожному значенні напруги робити три вимірювання кількості імпульсів та брати середнє значення.

6. Побудувати лічильну характеристику лічильника та визначити протяжність плато. Протяжність плато потрібно визначати так, щоб

його нахил не перевищував 0,25 %/В. Вимірювання провести з лічильником для β - та α -випромінювання.

7. Встановити на лічильнику робочу напругу, яка б відповідала середині плато характеристики; без джерела радіоактивного випромінювання виміряти швидкість лічби імпульсів або фон лічильника.

8. Оцінити похибку вимірювань.

Контрольні запитання

1. Які режими роботи можна здійснити у газовому лічильнику?
2. Чому анод газового лічильника роблять у вигляді нитки або вістря?
3. Поясніть методи гасіння розряду у газових лічильниках?
4. Що таке лічильна характеристика? Чому плато характеристики має невеликий нахил?

32. Статистичний характер радіоактивного Розпаду. Розподіл Пуассона [31, 30, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) радіометр Б-4; 2) електронний секундомір ССЕС-63; 3) джерело радіоактивного випромінювання ^{252}Cf ; 4) свинцева стінка.

Теоретичні відомості та опис приладів

Для кожної радіоактивної речовини існує деяка імовірність того, що ядро атома речовини перетвориться за час dt на нове ядро. Ця імовірність зумовлена тим, що кожний акт розпаду ядра є самочинним, незалежним процесом. Визначити імовірність можна, якщо спостерігати за кожним ядром з великої кількості N_0 протягом проміжку часу dt . Якщо за цей проміжок часу розпадеться dN ядер, то імовірність розпаду окремого ядра дорівнюватиме

$$dp = dN/N_0.$$

Поділивши обидві частини рівняння на dt , дістанемо імовірність розпаду одного ядра за одиницю часу:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{N_0} \frac{dN}{dt}.$$

Припускаючи, що ця імовірність розпаду ядра за одиницю часу не залежить від часу, з останнього виразу можна дістати закон зменшення кількості радіоактивної речовини у вигляді

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Цей закон строго виконується лише у випадку великого значення N_0 . При не дуже великих значеннях N_0 , як і в усіх статистичних явищах, спостерігаються відхилення кількості розпадів за певний проміжок часу від певного середнього значення кількості розпадів за цей проміжок часу. При цьому кількість розпадів, що близька до середнього, зустрічатиметься частіше, ніж значні відхилення від нього. Такі відхилення називають *флуктуаціями*. Кожному значенню кількості розпадів при даному середньому значенні відповідає певна імовірність. Теоретичним вираженням імовірності того, що за час Δt розпадеться ΔN ядер з великої кількості N_0 (якщо середнє значення кількості розпадів за цей проміжок часу дорівнює $\langle N \rangle$), є *розподіл Пуассона*.

Експериментально вимірюється не загальна кількість розпадів ядер, а кількість частинок, що випускається радіоактивним препаратом у певному тілесному куті. Позначимо кількість імпульсів, що реєструються радіометром за довільні рівні проміжки часу, N_i , а їх середнє значення за весь час вимірювання $\langle N_i \rangle$, тоді розподіл Пуассона матиме такий вигляд:

$$p(N_i) = (\langle N_i \rangle^{N_i} / N_i!) e^{-\langle N_i \rangle}. \quad (1)$$

Вимірюватимемо кількість імпульсів від джерела радіоактивного випромінювання, розміщеного на фіксованій відстані від лічильника Гейгера — Мюллера, протягом однакових проміжків часу τ . Незважаючи на сталу активність джерела (період піврозпаду значно перевищує час вимірювання), лічильний прилад фіксуватиме різну кількість імпульсів, що є наслідком випадковості радіоактивного розпаду. При значній кількості відліків n будь-яка кількість N_i зустрінеться m разів ($m > 1$). Імовірність появи цієї кількості визначається виразом

чи на сталу активність джерела (період піврозпаду значно перевищує час вимірювання), лічильний прилад фіксуватиме різну кількість імпульсів, що є наслідком випадковості радіоактивного розпаду. При значній кількості відліків n будь-яка кількість N_i зустрінеться m разів ($m > 1$). Імовірність появи цієї кількості визначається виразом

$$p(N_i) = m_i/n. \quad (2)$$

Середнє значення дискретної випадкової величини для цих вимірювань буде таким:

$$\langle N_i \rangle = \sum_{i=1}^n N_i p_i. \quad (3)$$

Але для оцінки відхилення вимірювальних кількостей імпульсів від середнього значення $\langle N_i \rangle$ потрібно знати дисперсію сукупності проведених вимірювань:

$$D(N_i) = \sum_{i=1}^n [N_i - \langle N_i \rangle]^2 p_i. \quad (4)$$

Додатну величину

$$\sigma = + \sqrt{D(N_i)} \quad (5)$$

називають *середньоквадратичним відхиленням* або *середньою квадратичною похибкою*. Робота виконується на установці Б-4, яка складається з перелічувального приладу ПП-16 та блока газових лічильників БГС-4. При використанні низьковольтних газорозрядних лічильників для живлення їх використовується напруга +390 В від випрямляча блока ПП-16. Після подачі на лічильник високої напруги і натискання кнопки «Пуск» на передній панелі блока ПП-16 імпульси від'ємної полярності з анода лічильника надходять на вхід каскаду підсилення блока БГС-4 (рис. 169). Підсилені імпульси з виходу блока БГС-4 по кабелю надходять на вхід перелічувального блока ПП-16. За допомогою вхідного пристрою імпульси змінюють знак, підсилюються і подаються на вхід схеми запуску першого декатрона. На кожний десятит імпульс, з тих що надійшли на вхід декатрона, на його виході

формується позитивний імпульс. Цей імпульс надходить у схему запуску другого декатрона. Другий декатрон лічить десятки імпульсів і передає кожний сотий імпульс на вхід третього і т. д. — до шостого декатрона. Декатрони типу ОГ-4 є елементами індикації в електронному секундомірі ССЕШ-63. Після ввімкнення секундоміра в мережу запуск декатронів здійснюється натисканням кнопки «Пуск», а зупинка — повторним натисканням її.

Порядок виконання роботи

1. Користуючись інструкцією до радіометра, підготувати його до роботи. Перевірити заземлення установки. Провести перевірку декатронів шляхом вимірювання кількості імпульсів за 1 хв при натисканні кнопки «Перевірка». Якщо прилад працює нормально, то швидкість лічби імпульсів повинна дорівнювати 50 ± 2 ім/с.

2. Одержати у лаборанта джерело радіоактивного випромінювання та розмістити його під лічильником. Лічильник з джерелом повинні знаходитись за свинцевою стінкою.

3. Виконати вимірювання кількості імпульсів за 30 с, вмикаючи одночасно ПП-16 та електронний секундомір. Таких вимірювань зробити 50. Значення N_i записувати у стовпчик.

4. Підготувати одержані результати вимірювань для математичної обробки. Для цього слід виявити найменшу та найбільшу кількості імпульсів з проведених n вимірювань: поділити різницю між цими значеннями на k однакових інтервалів так, щоб у перший увійшло найменше значення N_i , а в останній — найбільше; пронумерувати інтервали від 1 до k і, позначивши їх x_k , вважати надалі за випадкові величини. Переглядаючи таблицю значень N_i , виявити, скільки разів з'явився при вимірюваннях інтервал x_k .

5. Визначити імовірність появи кожного інтервалу за формулою (2).

6. Обчислити середнє значення величини x_k за формулою (3). Відповідний інтервал дасть середнє значення N_i сукупності n вимірювань.

7. За формулами (4) і (5) обчислити дисперсію та середньоквадратичне відхилення для x_k .

8. Побудувати графік залежності $p(x_k) = f(x_k)$ та показати на ньому область середньоквадратичного відхилення x_k .

Порівняти експериментальні результати з теоретичними, обчисленими за формулою (1).

Контрольні запитання

1. У чому полягає особливість закону радіоактивного розпаду?
2. Що називають абсолютною флуктуацією випадкової величини?
3. При якій умові розподіл Пуассона переходить у розподіл Гаусса?
4. Поясніть будову та принцип дії лічильника Гейгера — Мюллера.

33. Визначення періоду піврозпаду довгоживучого ізотопу [30, 31]

Прилади і матеріали: 1) радіометр Б-4; 2) електронний секундомір ССЕШ-63; 3) штангенциркуль; 4) лінійка; 5) джерело радіоактивного випромінювання ^{220}Rn ; 6) свинцева стінка.

Радіоактивний розпад — це процес, який підлягає закономірностям статистичного характеру, що виконується для дуже великого числа ядер. Він охоплює не лише перетворення ядер та їх поділ, а й перетворення елементарних частинок. Для певного радіоактивного ядра, що перебуває в якомусь енергетичному стані, імовірність розпаду за одиницю часу — величина стала. Вона називається *сталою розпаду* і не залежить від часу утворення ядра, від хімічного складу радіоактивного атома, температури, тиску, зовнішніх електричних та магнітних полів тощо. Тобто можна говорити, що для всіх природних радіоактивних речовин стала розпаду λ зберігає стале й характерне для кожної речовини значення протягом усього існування Землі. Це, в свою чергу, приводить до думки про те, що існує закон сталості швидкості радіоактивного розпаду.

Отже, кількість атомів, що розпадаються за час dt , повинна бути пропорційною загальній кількості атомів речовини і виражатися формулою $dN = -\lambda N \cdot dt$.

Інтегруючи це диференціальне рівняння, дістанемо:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де N_0 — кількість ядер у початковий момент часу, N — кількість ядер, які залишилися через проміжок $\Delta t = t - t_0$.

Дуже зручно швидкість радіоактивного розпаду характеризувати *періодом піврозпаду* T , який з рівняння розпаду (1) (при $N = N_0/2$) дорівнює:

$$T = \ln 2 / \lambda. \quad (2)$$

Визначаючи експериментально λ , за допомогою (2) можна підрахувати T . Це зручно зробити, ввівши величину, яка характеризує інтенсивність розпадів у препараті в цілому, а не окремого ядра. Величина λN_0 визначає кількість розпадів ядер препарату даної маси за одиницю часу і називається *активністю* a . За означенням $a = \lambda N_0$, звідки $\lambda = a/N_0$.

Відомо, що

$$N_0 = (m/\mu) N_A,$$

де m — маса ізотопу, кг; μ — молярна маса, кг/моль; N_A — число Авогадро, моль⁻¹. Тоді для λ дістанемо:

$$\lambda = a\mu/(mN_A).$$

Експериментально реєструється кількість частинок $\Delta N'$, що випускаються ізотопом в тілесному куті, обмеженому геометричними розмірами лічильника. Враховуючи це, знайдемо активність препарату:

$$a = \Delta N / \Delta t = (4\pi r^2 \cdot \Delta N') / (ld \cdot \Delta t),$$

де r — відстань від препарату до лічильника; l — ефективна довжина лічильника; d — діаметр лічильника.

Тоді період піврозпаду даного ізотопу

$$T = (N_A \ln 2 / 4\pi) (mld \cdot \Delta t) / (r^2 \mu \cdot \Delta N').$$

Підставляючи значення сталих величин, дістанемо робочу формулу (T — в роках):

$$T = 1,06 \cdot 10^{18} (mld \cdot \Delta t) / (r^2 \mu \cdot \Delta N').$$

Радіометр Б-4 складається з перелічувального приладу ПП-16, блока газових лічильників БГС-4. Імпульс струму, який виникає у лічильнику, підсилюється у блоці БГС-4 і надходить у перелічувальний прилад.

Для підрахунку кількості частинок, які пройшли крізь лічильник, у радіометрі використовуються декатрони. Це багатеелектродна лампа з холодними катодами. Всі електроди знаходяться у скляному балоні,

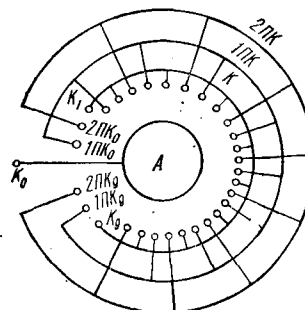


Рис. 170

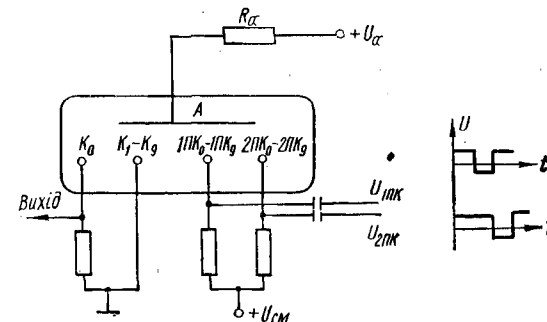


Рис. 171

заповненому інертним газом. Двоїмпульсний декатрон (рис. 170) складається з дискового анода A та тридцяти штирьових катодів, поділених на три групи: індикаторні катоди K , перші підкатоди $1ПК$, другі підкатоди $2ПК$. Катоди кожної групи з'єднані між собою всередині балона та мають спільні виводи (рис. 171). Винятком є один індикаторний катод K_0 , який виводиться на цоколь окремо і використовується для скидання відліку (він же нульовий показчик). При включенні приладу на декатрон подається напруга і між анодом та нульовим індикаторним катодом K_0 виникає тліючий розряд, сила струму якого обмежена опором R_a . Принцип лічби декатрона полягає у перенесенні тліючого розряду з одного катода на інший. Для реєстрації одного електричного імпульсу, що надходить з лічильника, з нього формують два від'ємних, зсунутих один відносно одного у часі на одне значення тривалості імпульсу. Ці від'ємні імпульси подаються на перший і другий підкатоди. Оскільки електроди, які розташовані поблизу оточеного розрядом катода, завжди мають низьку напругу запалювання, то поява імпульсу на групі $1ПК$ викличе запалювання розряду на $1ПК_0$, поява імпульсу на групі $2ПК$ — запалювання на $2ПК_0$, закінчення імпульсу на $2ПК$ — запалювання K_1 . Час перенесення розряду — порядку 10^{-5} с. Внаслідок спільного анодного опору одночасне горіння розряду на двох катодних електродах неможливе. Отже, кожний імпульс з лічильника переносить розряд з одного індикаторного катода на інший. Десять імпульсів переносить розряд вздовж усього кільця катодів. При перенесенні розряду на нульовий індикаторний катод на опори виникає вихідний імпульс, який подається у наступний

каскад з декатроном. Цей каскад вже підраховуватиме десятки імпульсів, третій каскад — сотні імпульсів і так далі. В радіометрах використовуються декатрони ОГ-3 (максимальна швидкість лічби імпульсів 20000 імп/хв) та ОГ-4 (максимальна швидкість лічби імпульсів 2000 імп/хв).

Лічильник Гейгера — Мюллера з досліджуванним радіоактивним ізотопом стронцію-90 знаходиться за свинцевою стінкою, складеною з окремих блоків.

Порядок виконання роботи

1. Підготувавши установку до роботи, одержати у лаборанта радіоактивний препарат. Перед вмиканням радіометра в мережу виміряти геометричні параметри лічильника.

2. Увімкнути установку та перевірити роботу перелічувального пристрою. Для цього три рази (по 1 хв) виміряти кількість імпульсів при натисканні кнопки «50 Гц».

3. Закріпити радіоактивний препарат на відстані 15—20 см від лічильника. Натиснути кнопку «Сброс» — покази всіх декатронів повинні засвітитися на позначці «Нуль».

4. Визначити швидкість лічби імпульсів від даного препарату. Для цього зробити 5 вимірювань по 10 хв і знайти середнє значення.

5. Використовуючи паспортні характеристики даного ізотопу, визначити період його піврозпаду. Зробити висновки з роботи.

Контрольні запитання

1. Який фізичний зміст сталої розпаду λ та її зв'язок з періодом піврозпаду?
2. Що таке активність радіоактивного препарату? Які одиниці її вимірювання?
3. Запропонуйте метод вимірювання періоду піврозпаду для короткоживучого ізотопу.

34. Визначення граничної енергії β -спектра радіоактивного ізотопу методом поглинання [31, 30]

Прилади та матеріали: 1) радіометр Б-4; 2) радіоактивний препарат ^{22}Na ; 3) набір алюмінієвих пластинок; 4) мікрометр; 5) секундомір.

Теоретичні відомості та опис приладів

На відміну від α - та γ -випромінювань, що випускаються радіоактивними ядрами, β -випромінювання характеризується *неперервним* енергетичним спектром. Типовий розподіл енергії, або спектр β -частинок, подано на рис. 172. Спектри всіх β -випромінювачів, включаючи штучні радіоактивні ізотопи, подібні до зображеного на малюнку. Відрізняються вони лише максимальним значенням енергії, або верхньою межею, яка для різних ізотопів знаходиться в межах від 18 кеВ (для ^3H) до 16,6 МеВ (для ^{12}N).

Відомо, що викидання β -частинки є результатом квантового переходу протона в нейтрон або нейтрона в протон, подібно до того, як випромінювання фотона атомом є результатом переходу електрона між дво-

ма квантовими станами. Особливість β -розпаду полягає в утворенні поряд з електроном (позитроном) нейтріно, яке забирає частину енергії, що вивільняється в акті розпаду. Якщо β -перетворення відбувається з нормального енергетичного стану материнського ядра на нормальний рівень дочірнього ядра, то спектр називають простим. У багатьох випадках дочірнє ядро утворюється у збудженому стані, і його перехід у нормальний стан завершується випусканням γ -фотона. Крім того, існують ядра, у яких при β -перетворенні виявляються два канали розпаду, кожний з яких веде до свого певного енергетичного рівня дочірнього ядра. Отже, β -спектри, як і спектри α -випромінювання, дають змогу вивчати енергетичні рівні ядер. У випадку β -спектрів вна-

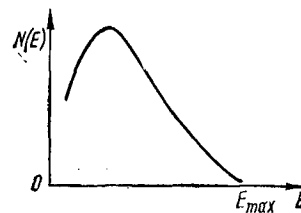


Рис. 172

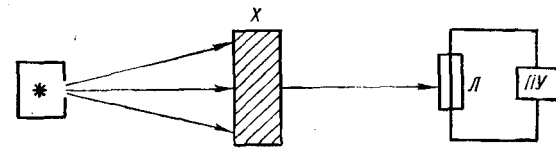


Рис. 173

слідок утворення двох частинок для визначення рівнів ядер треба користуватися значенням максимальної енергії спектра. Грунтовне дослідження β -спектрів потребує складної апаратури, наприклад магнітного спектрометра та джерел великої активності. Граничну енергію можна визначити методами поглинання.

Один з методів поглинання ґрунтується на аналізі кривої поглинання β -частинок у речовині. Якщо через поглинач (рис. 173) пропускати потік частинок, то внаслідок розсіювання електронів з низькою енергією та вибування їх з потоку розподіл електронів по товщині шару поглинача має досить складний характер. У першому наближенні залежність інтенсивності потоку β -частинок від товщини x поглинача дається експоненціальною залежністю

$$I_x = I_0 e^{-\mu \rho x},$$

де I_0 — інтенсивність падаючого на поглинач потоку; I_x — інтенсивність потоку після проходження шару поглинача товщиною x ; μ — масовий коефіцієнт послаблення; ρ — густина речовини.

Величину ρx (кг/м²) називають *масовою товщиною* поглинаючого шару. Вона є досить зручною мірою відстаней у поглинаючому середовищі. При повному поглинанні потоку β -випромінювання у даній речовині значення x_{max} називають *пробігом* частинки. Зрозуміло, що пробіг x_{max} визначається максимальною енергією спектра частинок та фізико-хімічними особливостями поглинаючої речовини. Величину $\rho x_{\text{max}} = R$ називають *ефективним масовим пробігом*. Вона майже не залежить від роду поглинача і зручна для визначення граничної енергії β -спектра. Їх зв'язок дається такими емпіричними залежностями:

$$R = 0,54 E_{\text{max}} - 0,13 \quad \text{для} \quad 0,8 < E < 3 \text{ МеВ}, \quad (1)$$

$$R = 0,41 E^{1,4} \quad \text{для} \quad 0,15 < E < 0,8 \text{ МеВ}. \quad (2)$$

В цих залежностях K вимірюється в грамах на квадратний сантиметр, а E — в мегаелектронвольтах.

Для експериментального визначення E_{\max} між джерелом β -випромінювання та лічильником Гейгера — Мюллера розміщують алюмінієві або мідні пластинки певної товщини. Із збільшенням товщини шару пластинок швидкість лічби імпульсів зменшується і при $x = R$ стає такою, що дорівнює фоновій. Побудувавши криву залежності між швидкістю лічби частинок і товщиною шару поглинач, можна визначити R (рис. 174). Визначення R ускладнюється тим, що форма β -спектра поблизу граничного значення енергії асимптотично наближається до осі x , тобто не має різкої межі. Для усунення цього варто побудувати графік $N(x)$ у напівлогарифмічному масштабі, тобто

$$\lg(N) = f(x).$$

Більш точний метод визначення E_{\max} полягає у визначенні товщин шару поглинач, при яких інтенсивність потоку β -частинок зменшується у 2^n разів ($n = 1, 2, 3, \dots$). Гранична енергія визначається за

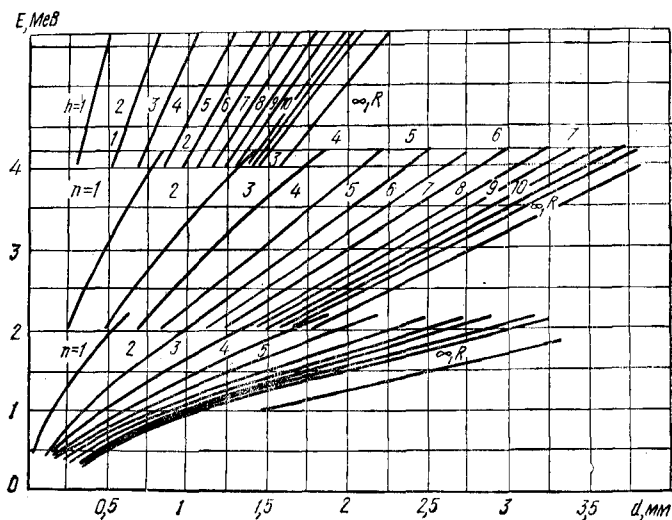


Рис. 175

допомогою номограми (рис. 175). Вдovж осі абсцис відкладено товщину шару алюмінію, яка зменшує інтенсивність потоку у $2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^n$ разів (цифри біля кривих відповідають значенням n), а вдovж осі ординат — граничну енергію. Для визначення граничної енергії цим методом треба відшукати (за допомогою кривої поглинання рис. 174) товщини, при яких інтенсивність спадає у 2, 4, 9, ... разів, і за графіками рис. 175 знайти ряд значень E_{\max} . Використовуючи ці значення, будують графік $E_{\max} = f(n)$ і дістають криву з горизонтальною асимп-

тотою. Ордината цієї асимптоти і визначає граничне значення енергії β -спектра.

Джерело β -частинок розташоване у спеціальному свинцевому контейнері з невеликим отвором (коліматором) для виділення вузького пучка. Над коліматором закріплено рамку для алюмінієвих або мідних пластинок. Швидкість лічби частинок здійснюється за допомогою радіометра Б-4.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з інструкцією до радіометра Б-4. Перевірити з'єднання перелічувального приладу ПП-16 з блоком газових лічильників та надійність заземлення установки.

2. Увімкнути установку в мережу та перевірити роботу декатронів (див. роботу 33). Визначити фон лічильника, зробивши 5 вимірювань кількості імпульсів по 1 хв кожне. Взяти середнє значення.

3. Одержати у лаборанта джерело радіоактивного випромінювання та набір пластинок. Виміряти товщину пластинок мікрометром. Вкладаючи у рамку по одній пластинці, вимірювати швидкість лічби імпульсів. Для кожної товщини поглинач робити по 3 вимірювання та брати середнє значення. Поблизу товщини повного поглинання робити по 5 вимірювань.

4. Побудувати графіки $N = f(x)$ та $\ln(N) = f(x)$. За другим графіком визначити x_{\max} . Визначити R . Користуючись формулою (1) або (2) (за вказівкою викладача), визначити E_{\max} .

5. Користуючись графіком $N = f(x)$ та номограмою рис. 175, визначити E_{\max} і порівняти із значенням, добутиим на основі емпіричних залежностей.

Контрольні запитання

1. Чому енергетичний спектр β -розпаду неперервний?
2. Яка залежність інтенсивності потоку β -випромінювання від товщини шару поглинач? Що таке масовий коефіцієнт послаблення?
3. Що називають пробігом частинки і від чого він залежить?
4. Чим зумовлений фон лічильника Гейгера — Мюллера?

35. Визначення енергії α -частинок за довжиною вільного пробігу у повітрі [31, 30, заводські інструкції]

Прилади і матеріали: 1) перелічувальний прилад ПСТ-100; 2) високовольтний випрямляч ВСВ-2; 3) блок фотопомножувача УСС-1; 4) радіоактивний препарат з α -випромінюванням 2П9.

Теоретичні відомості та опис приладів

При вивченні α -розпаду виявилось, що важкі ядра, як правило, випускають кілька груп α -частинок з різними енергіями. Найінтенсивніша група пов'язана з переходом з основного стану материнського ядра в основний стан дочірнього ядра. Переходи із збудженого рівня материнського ядра супроводяться викиданням більш енергетичних

(довгопробіжних) α -частинок. Переходи з основного стану материнського ядра на збуджені рівні дочірнього ядра супроводяться випусканням моноенергетичних груп α -частинок. Різниця в енергіях для цих груп відповідає різним енергетичним рівням збудження дочірнього ядра.

Отже, енергетичний спектр α -випромінювання дає велику й цінну інформацію про будову ядра.

Одним з методів визначення енергії α -частинок є вимірювання довжини їх вільного пробігу в речовині. Вивчення треків α -частинок в камері Вільсона, фотоемулсіях показало, що вони спричинюють сильну іонізацію. В результаті цього α -частинки втрачають енергію і гальмуються. Іонізаційне гальмування є головним механізмом втрат енергії при проходженні заряджених частинок через речовину. У цьому ме-

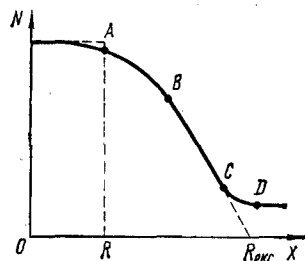


Рис. 176

ханізмі кінетична енергія частинки витрачається на збудження й іонізацію молекул середовища. В міру гальмування α -частинка все більше часу перебуває поблизу кожної молекули, і тому імовірність іонізації та збудження зростає при зменшенні швидкості α -частинки. Відстань, яку проходить α -частинка до повної зупинки, називають *пробігом*. Значення пробігу залежить від кількості можливих зіткнень з молекулами речовини, і тому говорять про середнє значення пробігу $\langle R \rangle$. Численні експерименти дали змогу встановити, що в повітрі середній пробіг $\langle R \rangle$ α -частинки приблизно пропорційний кубу її початкової швидкості:

$$\langle R \rangle = av^3,$$

де $a = 9,6 \cdot 10^{-24} \text{ с}^3/\text{м}^2$.

У більшості газів пробіг α -частинок становить кілька сантиметрів. У твердих тілах та рідинах він досить малий. Так, кількох листочків паперу достатньо для поглинання більшості α -частинок, що випускаються радіоактивними елементами. Проте не слід робити висновок, що вони не здатні чинити біологічну дію внаслідок малого пробігу. Навпаки, оскільки ці частинки віддають свою величезну енергію на досить обмеженому шляху, вони стають причиною досить значних біологічних змін в живому організмі. Обробка точних вимірювань пробігу α -частинок та їхніх енергій до 10 MeV (природні α -випромінювачі) дала

таку залежність між енергією та середнім пробігом:

$$\langle R \rangle = kE_\alpha^{3/2}.$$

Якщо середній пробіг вимірювати в сантиметрах, а енергію в мегаелектронвольтах, то коефіцієнт $k = 0,318 \text{ см/MeV}^{3/2}$. Тоді остання залежність має вигляд

$$\langle R \rangle = 0,318E_\alpha^{3/2}. \quad (1)$$

При більших енергіях (до 200 MeV) показник степеня енергії зростає від 1,5 до 1,8.

Помістимо джерело α -частинок на деякій відстані від чутливого детектора (флуоресцюючий екран в оптичному контакті з фотопомножувачем). α -частинки, гальмуючись в речовині екрана, викликають світіння, яке вибиває, в свою чергу, електрони з фотокатода помножувача. Отже, в колі фотопомножувача проходить струм, який залежить від інтенсивності потоку α -частинок, що падають на екран. На рис. 176 подано криву зміни інтенсивності лічби імпульсів залежно від зміни відстані між джерелом та екраном. Якби всі α -частинки мали однаковий пробіг, то інтенсивність лічби при збільшенні x спочатку залишалася б сталою, а потім при $x = R$ різко падала б. Насправді крива спочатку паралельна осі абсцис, а в точці A починається різкий спад, який сповільнюється в точці B. Пунктирна лінія, проведена як продовження відрізка лінії BC, відсікає на осі абсцис відрізок, що називається *екстрапольованим* пробігом $R_{\text{екс}}$. Враховуючи можливі флуктуації в значеннях енергії α -частинок, що випускаються невідомим радіоактивним препаратом, середній пробіг визначають, аналізуючи нахил відрізка BC кривої $N = f(x)$. Для точнішого встановлення довжини середнього пробігу доцільно побудувати графічну залежність не швидкості лічби N від товщини поглинача, а деяку її функцію, яка «спрямляє» хід залежності $N(x)$. Практично добрі результати можна мати при побудові графіка $N(x)$ у напівлогарифмічному масштабі, тобто

$$\lg N(x) = f(x).$$

При відстанях, більших за $R_{\text{екс}}$, значення логарифма стає і дорівнює $\lg N_f$; при малих відстанях зростання $\lg N$ практично лінійне. Точка перетину двох екстраполяційних прямих дасть значення $\langle R \rangle$.

Для реєстрації α -частинок використовується радіометр ПП-8 (рис. 168) з виносним блоком УСС-1. Схематично блок сцинтиляційного лічильника зображено на рис. 177. α -випромінювач 3 закріплений на рухомому тримачі 4, який переміщується при обертанні гвинта 2. Відстань між джерелом α -частинок і сцинтиляційним екраном 5 вимірюється по шкалі 1. У блоці знаходяться фотопомножувач ФЭУ-29—6 та попередній підсилювач сигналів 7. Перелічувальний прилад, високовольтний випрямляч та сцинтиляційний лічильник з'єднані спеціальними кабелями. Вся установка має бути надійно заземлена.

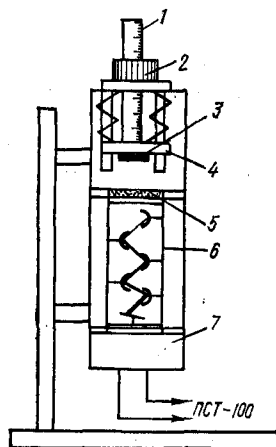


Рис. 177

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути високовольтний стабілізований випрямляч ВСВ-2 тумблером «Сеть».

2. Увімкнути лічильний прилад ПСТ-100 спочатку тумблером «Сеть», а після 1—2 хв тумблером «Анод».

Після прогрівання приладів перемикач на ВСВ-2, який вмикає високу напругу, поставити в положення «Вкл». Перемикачем «Грубо» встановити напругу 900—1000 В. Перевірити роботу лічильного приладу. Для цього натискувати кнопку «Сброс». При цьому покази на декартронних блоках «Секунды» та «Импульсы» повинні дорівнювати нулю. Натиснути кнопку «50 Гц» та підрахувати кількість імпульсів за 1 хв.

3. Кнопку «Имп» — «Сек» поставити в положення «Сек» і натиснути кнопку $\frac{10^4}{100}$. При цьому лічильник автоматично зупиниться через кожні 100 с.

4. На лінійці виносного блока УСС-1 встановити максимальну відстань джерела α -частинок від детектора.

5. Натиснути кнопку «Пуск» і після автоматичної зупинки лічильника зняти покази на декартонах блока «Импульсы». Не змінюючи положення лінійки, зробити ще два вимірювання кількості імпульсів та визначити середнє значення.

6. Змінюючи покази на лінійці виносного блока через кожні 3 мм, виконати операції, зазначені в п. 5.

7. Побудувати графік залежності кількості зареєстрованих частинок від відстані між джерелом α -частинок та детектором, а потім графік $\lg N_i = f(x)$. Визначити R та за формулою (1) знайти енергію α -частинок даного ізотопу.

Контрольні запитання

1. Поясніть дискретність енергетичного спектра α -випромінювання.
2. Поясніть механізм втрати енергії α -частинкою при русі в різних середовищах.
3. Яка особливість реєстрації α -випромінювання у порівнянні з β - і γ -випромінюванням?
4. Чому траєкторії α -частинок в повітрі прямолінійні?

ДОДАТОК

Таблиця 1

Фундаментальні фізичні константи

Константа	Позначення	Числове значення	Середня квадратична похибка $\sigma \cdot 10^{-4}$, %
Швидкість світла у вакуумі	c	299 792 458 (1,2) м · с ⁻¹	0,004
Магнітна стала	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн · м ⁻¹ = = 1,25663706144 · 10 ⁻⁶ Гн × × м ⁻¹	
Електрична стала	$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1}$	8,85418782 (7) · 10 ⁻¹² Ф · м ⁻¹	0,008
Стала Планка	h	6,626176 (36) · 10 ⁻³⁴ Дж × × Гц ⁻¹	5,4
	$h/2\pi$	1,0545887 (57) · 10 ⁻³⁴ Дж · с	5,4
Маса спокою електрона	m_e	9,109534 (47) · 10 ⁻³¹ кг	5,1
Маса спокою протона	m_p	5,4858026 (21) · 10 ⁻⁴ а.о.м.	0,38
Маса спокою нейтрона	m_n	1,6726485 (86) · 10 ⁻²⁷ кг	5,1
Елементарний заряд	e	1,007276470 (11) а.о.м.	0,011
Відношення заряду електрона до його маси	e/m_e	1,6749543 (86) · 10 ⁻²⁷ кг	5,1
Атомна одиниця маси (а. о. м.)		1,008665012 (37) а.о.м.	0,037
(10 ⁻³ кг × моль ⁻¹)/N _A		1,6021892 (46) · 10 ⁻¹⁹ Кл	2,9
Маси атомів в а. о. м.:			
Протон	p	1,7588047 (49) · 10 ¹¹ Кл × × кг ⁻¹	2,8
Водень	^1H	1,6605655 (86) · 10 ⁻²⁷ кг	5,1
Дейтерій	^2H		
Гелій	^4He		
Стала Авогадро	N_A	1,007276470 (11)	0,011
Стала Фарадея	$F = N_A e$	1,007825036 (11)	0,011
Стала Больцмана	$k = R/N_A$	2,014101795 (21)	0,010
		4,002603267 (48)	0,012
		6,022045 (31) · 10 ²³ моль ⁻¹	5,1
		96484,56 (27) Кл · моль ⁻¹	2,8
		1,380662 (44) · 10 ⁻²³ Дж · К ⁻¹	32

Продовження табл. 1

Константа	Позначення	Числове значення	Середня квадра- тична по- хибка $\sigma \cdot 10^{-4}$, %
Стала Стефана — Больцмана	$\sigma = (\pi^2/60) \cdot k^4 8\pi^3/h^3 c^2$	$5,67032 (71) \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \times$ $\times \text{К}^{-4}$	125
Перша стала ви- промінювання	$c_1 = 2\pi h c^2$	$3,741832 (20) \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$	5,4
Друга стала ви- промінювання	$c_2 = hc/k$	$0,01438786 (45) \text{ м} \cdot \text{К}$	31
Стала Рідберга	R_∞	$10973731,77 (83) \text{ м}^{-1}$	0,075

Примітки: 1. Значення констант наведено з таблицею стандартних довідкових даних ГСССД 1—76, затвердженою Державним комітетом стандартів Ради Міністрів СРСР 31 березня 1976 р.

2. Число в дужках після числового значення величин відповідає стандартно-му відхиленню цього значення для останніх вказаних значущих цифр.

Таблиця 2

Діелектричні проникності деяких речовин при 20 °С

Речовина	ϵ	Речовина	ϵ
<i>Гази</i>		<i>Тверді тіла</i>	
Азот	1,00060	Капрон	3,6—5,0
Водень	1,00027	Мармур	8,0—10,0
Повітря	1,00058	Плексиглас	3,0—3,6
Кисень	1,00055	Поліхлорвініл	3,0—5,0
Вуглекислий газ	1,00096	Поліетилен	2,2—2,4
<i>Рідини</i>		Слюда	4,0—8,0
Вода	81,0	Скло звичайне	5,0—10,0
Гліцерин	39,1	Текстоліт	7,0
Спирт етиловий	25,0	Титанат барію	1200
Скипидар	2,2	Фарфор	4,4—6,8

Таблиця 3

Питомий опір деяких твердих тіл ρ , Ом · м, при 20 °С і температурний коефіцієнт опору α , К⁻¹

Речовина	$\rho \cdot 10^8$	$\alpha \cdot 10^3$	Матеріал	$\rho \cdot 10^8$	$\alpha \cdot 10^3$
Срібло	1,60	4,1	Сплави Константан (Cu 58 %, Ni 40 %, Mn 1,2 %)	50,0	0,002
Мідь	1,67	4,3			
Золото	2,22	4,1			
Алюміній	2,90	4,7			

Продовження табл. 3

Речовина	$\rho \cdot 10^8$	$\alpha \cdot 10^3$	Матеріал	$\rho \cdot 10^8$	$\alpha \cdot 10^3$
Вольфрам	5,50	4,8	Манганін (Cu 85 %, Mn 12 %, Ni 3 %)	43,0	0,02
Нікель	6,84	6,0			
Залізо	9,71	6,5			
Платина	10,70	3,9			

Таблиця 4

Допустимі сили струму в ізолюваному проводі при тривалій роботі

Речовина	Площа перерізу, мм²							
	1	1,5	2,5	6	10	16	25	
	Допустима сила струму, А							
Мідь	11	14	20	25	31	43	75	100
Алюміній	8	11	16	20	24	34	60	80
Залізо	—	—	8	10	12	17	30	—

Таблиця 5

Питома електропровідність водних розчинів електролітів $\sigma \cdot 10^2$, Ом⁻¹ · м⁻¹, при 18 °С

Концентрація, %	NaCl	CuSO ₄	AgNO ₃	KOH	H ₂ SO ₄
5	0,067	0,0189	0,0256	0,172	0,209
10	0,121	0,0320	0,0476	0,315	0,392
15	0,164	0,0421	0,068	0,425	0,543
20	0,196		0,087	0,499	0,653
25	0,214		0,106	0,540	0,717
30			0,124	0,542	0,740
35			0,141	0,509	0,724
40			0,157	0,450	0,680

Таблиця 6

Електрохімічні еквіваленти речовин

Аніони	Електрохімічний еквівалент, мг/Кл	Маса речовини, що виділяється, 1 А · год · г	Катіони	Електрохімічний еквівалент, мг/Кл	Маса речовини, що виділяється, 1 А · год · г
Cl ⁻	0,367	1,32	Ag ⁺	1,1180	4,025
[NO ₃] ⁻	0,643	2,31	Au ³⁺	0,683	2,451
O ₂ ⁻	0,0829	0,293	Cu ²⁺	0,329	1,19
[OH] ⁻	0,177	0,635	H ⁺	0,01045	0,0376
[SO ₄] ²⁻	0,499	1,79	Hg ²⁺	2,079	7,48

Продовження табл. 6

Аніони	Електрохімічний еквівалент, мг/Кл	Маса речовини, що виділяється, 1 А · год · г	Катіони	Електрохімічний еквівалент, мг/Кл	Маса речовини, що виділяється, 1 А · год · г
$[\text{CO}_3]^{2-}$	0,311	1,12	Ni^{3+}	0,203	0,73
			Pb^{2+}	1,074	3,87
			Zn^{2+}	0,339	1,22

Таблиця 7

Термо-е.р.с. термопар мідь — константан, мкВ; холодний спай при 0 °С

°С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	389	787	1194	1610	2035	2467	2908	3357	3813	4277
100	4277	4749	5227	5712	6204	6703	7208	7719	8236	8759	9288
200	9288	9823	10363	10909	11459	12015	12575	13140	13710	14285	14864

Таблиця 8

Точка Кюрі

Речовина	Точка Кюрі, К	
<i>Сегнетоелектрики</i>		
Метатитанат барію	373	Верхня Нижня
Сегнетова сіль	295,5	258,0
<i>Ферромагнетики</i>		
Залізо	1043	
Залізо кремнисте (4,3 % Si)	963	
Кобальт	1403	
Нікель	631	
Пермалой (22 % Fe, 78 % Ni)	823	
Магнетит Fe_3O_4	845	
Сплав Гейслера (61 % Cu, 26 % Mn, 13 % Al)	603	

Таблиця 9

Абсолютні показники заломлення дистильованої води при 293 К для різних довжин хвиль

λ , нм	n	λ , нм	n
431,1	1,3403	589,3	1,3330
486,1	1,3371	656,2	1,3311
546,0	1,3345	768,2	1,3289

Таблиця 10

Абсолютні показники заломлення деяких рідин для жовтої спектральної лінії D натрію ($\lambda_D = 589,3$ нм)

Рідина	T , К	n_D
Анілін	293,0	1,58630
Ацетон	292,4	1,35886
Гліцерин	293,0	1,47300
Метиловий спирт	287,5	1,33118
Етиловий спирт	291,2	1,36242

Таблиця 11

Густина водних розчинів цукру при 293 К (концентрація дана у масових процентах)

C , %	$\rho \cdot 10^3$ кг/м³	C , %	$\rho \cdot 10^3$ кг/м³	C , %	$\rho \cdot 10^3$ кг/м³
5	1,01785	20	1,08096	35	1,15129
10	1,03814	25	1,10352	40	1,17645
15	1,05917	30	1,12698	45	1,20256
				50	1,22957

Таблиця 12

Довжини хвиль ліній у спектрі неону

Положення і забарвлення лінії	Довжина хвилі λ , нм	Відносна яскравість
Яскраво-червона	640,2	10
Червоно-оранжева, ліва з двох близьких ліній	614,3	10
Оранжева, перша помітна вліво від четвертої	594,5	5
Жовта	585,2	20
Світло-зелена, перша помітна вправо від четвертої	576,0	4
Зелена ліва з двох одиноких ліній	540,0	6
Зелена права з двох одиноких ліній	533,0	8
Зелена права з п'яти рівновіддалених ліній	503,1	5
Синьо-зелена одинока	484,9	8

Таблиця 13

Довжини хвиль ліній у спектрі ртуті

Положення і забарвлення лінії	Довжина хвилі λ , нм	Відносна яскравість
Яскраво-червона	623,4	4
Жовта	578,0	10
Світло-зелена	546,0	10
Світло-голуба	491,6	10
Синя	435,8	10
Фіолетова	406,2	7

Таблиця 14

Довжини хвиль ліній у спектрі гелію

Забарвлення лінії	Довжина хвилі λ , нм	Інтенсивність	Примітка
Червона	728,1	3P	Буква Р означає лінію паргелію (сингулетна лінія) Буква О означає лінію ортогелію (триплетна лінія)
Червона	706,5	5O	
Червона	667,8	6P	
Жовта	587,6	10O	
Зелена	501,6	10P	
Зелена	492,2	4P	
Голуба	471,3	3O	

Забарвлення ліній	Довжина хвилі λ , нм	Інтенсивність	Примітка
Синя	447,1	60	З часом електроди поглинають гелій і тиск в розрядній трубці знижується. Внаслідок цього відбувається підсилення ліній паралелю
Синя	438,8	3Р	
Фіолетова	412,1	30	
Фіолетова	402,6	50	

Таблиця 15

Червона границя фотоэффекту для деяких речовин, нм

Речовина	λ , нм	Речовина	λ , нм
Барій	484	Платина	190
Барій на вольфрамі	1130	Рубідій	573
Вольфрам	272	Срібло	261
Германій	272	Торій на вольфрамі	473
Закис міді	239	Цезій	662
Нікель	249	Цезій на вольфрамі	909
Оксид барію	1235	Цезій на платині	895

Таблиця 16

Періоди піврозпаду деяких ізотопів

Ізотоп	Період піврозпа- ду T	Ізотоп	Період півроз- паду T
$^{192}_{77}\text{Ir}$	74,4 дні	$^{45}_{20}\text{Ca}$	153 дні
$^{137}_{55}\text{Cs}$	26,6 року	$^{204}_{81}\text{Tl}$	3,56 року
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,2 року	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$24,39 \cdot 10^3$ років
$^{90}_{38}\text{Sr}$	28,1 року	$^{210}_{84}\text{Po}$	138,4 дні

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Бушок Г. Ф. Дидактичні основи викладання фізики в педвузах. К. : Вища школа, 1978. 231 с.
- Охрана труда и техника безопасности в общеобразовательной школе. М. : Педагогика, 1978. 104 с.
- Манойлов В. Е. Основы электробезопасности. Л. : Энергия, 1971. 320 с.
- Воронина А. А., Шибенко Н. Ф. Техника безопасности при работе на электроустановках. М. : Высш. школа, 1969. 192 с.
- Долин П. А. Действие электрического тока на человека и первая помощь пострадавшему. 2-е изд. М. : Энергия, 1976. 128 с.
- Шилов В. Ф. Техника безопасности в кабинете физики. М. : Просвещение, 1979. 79 с.
- ГОСТ 22261—76. Средства измерений электрических величин. Введ. 00.00.77. 42 с.
- Кучерук І. М., Дущенко В. П., Андріанов В. М. Обробка результатів фізичних вимірювань. К. : Вища школа, 1981. 216 с.
- Меняйлов М. Е. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. К. : Вища школа, 1974. 391 с.
- Гершензон Е. М., Малов Н. Н. Курс общей физики. Электричество и магнетизм. М. : Просвещение, 1980. 223 с.
- Сивухин Д. В. Общий курс физики : В 3-х т. М. : Наука, 1977. Т. 3. Электричество. 687 с.
- Калашников С. Г. Электричество. М. : Наука, 1977. 591 с.
- Савельев И. В. Курс общей физики : В 2-х т. М. : Наука, 1970. Т. 2. Электричество. 430 с.
- Физический практикум. Электричество и оптика. 2-е изд. / Под ред. В. И. Ивероновой. М. : Наука, 815 с.
- Рязанов Г. А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. М. : Наука, 1966. 208 с.
- Попов В. С. Электрические измерения. 2-е изд. М. : Энергия, 1974. 399 с.
- Справочник по радиоизмерительным приборам : В 3-х т. / Под ред. В. С. Насонова. М. : Сов. радио, 1976. Т. 1. 222 с.; Т. 2. 271 с.; Т. 3. 423 с.
- Лавриненко В. Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. 9-е изд. К. : Техника, 1980. 464 с.
- Нижний С. М. Мосты переменного тока. М. ; Л. : Энергия, 1966. 128 с.
- Электрические свойства полимеров / Под ред. В. И. Сажина. Л. : Химия, 1970. 376 с.
- Жеребцов И. П. Основы электроники. 3-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергия, 1974. 463 с.
- Ландсберг Г. С. Оптика. К. : Рад. школа, 1961. 731 с.
- Горбань І. С. Оптика. К. : Вища школа, 1979. 223 с.
- Гершензон Е. М., Малов Н. Н., Эткин В. С. Курс общей физики. Оптика и атомная физика. М. : Просвещение, 1981. 240 с.
- Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика М. : Наука, 1980. 396 с.
- Білий М. У. Атомна фізика. К. : Вища школа, 1973. 396 с.
- Таблицы спектральных линий / Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. М. : Наука, 1969. 607 с.
- Годжаев Н. М. Оптика. М. : Высш. школа, 1977. 432 с.
- Епифанов Г. И. Физика твердого тела. М. : Высш. школа, 1977. 288 с.
- Королев Ф. А. Курс физики. Оптика. Атомная и ядерная физика. М. : Просвещение, 1974. 608 с.
- Вальтер А. К., Залюбовский И. И. Ядерная физика. Х. : Вища школа, 1978. 424 с.

Лабораторні роботи

Організація лабораторних занять і питання техніки безпеки	3
Розділ третій	

Електрика і магнетизм

I. Вивчення принципу дії і основних характеристик електровимірювальних приладів	8
1. Перевірка технічного вольтметра	16
II. Перевірка технічного амперметра	17
III. Перевірка технічного вольтметра і амперметра за допомогою універсального цифрового вольтметра	19
IV. Розширення меж вимірювання амперметра і вольтметра	20
V. Вимірювання малих струмів гальванометром магнітоелектричної системи	21
2. Моделювання електричних полів	25
I. Моделювання електростатичних полів з використанням розчину електроліту	26
II. Моделювання електростатичних полів з використанням електропровідного паперу	27
III. Перевірка теореми Остроградського — Гаусса	29
3. Визначення різниці потенціалів абсолютним методом	31
4. Визначення ємності конденсаторів	33
I. Визначення ємності конденсатора методом порівняння	34
II. Визначення ємності конденсатора методом містка змінного струму та резонансним методом	37
5. Вивчення діелектриків	39
I. Вивчення діелектричних властивостей полімерних електроізоляційних матеріалів	40
II. Визначення температури Кюрі сегнетоелектрика	43
6. Вивчення законів постійного струму в металах і електролітах	44
I. Перевірка закону Ома для повного кола	45
II. Перевірка законів Кірхгофа	47
III. Вивчення будови акумулятора та дослідження роботи і потужності в електричному колі	49
IV. Визначення електрорушійної сили джерела методом компенсації	52
V. Визначення внутрішнього опору джерела струму	55
VI. Дослідження законів електролізу та визначення заряду одновалентного іона	57
7. Вимірювання опорів і визначення їх температурної залежності	59
I. Визначення великих та малих опорів за допомогою місткових схем	60
II. Визначення опорів за допомогою вольтметра та амперметра	63
III. Вивчення залежності опору металів від температури і визначення температурного коефіцієнта опору	64
IV. Вивчення залежності опору електролітів від температури	66
V. Градування вольтметра для вимірювання великих та малих опорів	67
8. Вивчення контактних електричних явищ	68
I. Виготовлення та градування термопар	69
II. Дослідження прямих та зворотних термоелектричних явищ	71
9. Дослідження електричного струму в напівпровідниках	74
I. Вивчення залежності опору напівпровідників від температури	75
II. Дослідження напівпровідникового діода	77
III. Дослідження статичних характеристик транзистора і визначення його коефіцієнта підсилення	78

10. Дослідження електричного струму у вакуумі	82
I. Вивчення явища термоелектронної емісії	83
II. Зняття анодної і сіткової характеристик електронних ламп	85
11. Дослідження силових характеристик магнітного поля	88
I. Визначення силових характеристик магнітного поля електродинамометром	89
II. Визначення напруженості магнітного поля соленоїда на його осі	90
III. Визначення індукції магнітного поля між полюсами електромагніта за допомогою мілівеберметра	92
IV. Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі	94
V. Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки і магнетрона	96
12. Дослідження магнітних властивостей речовини	99
I. Визначення магнітної проникності феритів	100
II. Визначення точки Кюрі феромагнітних сплавів металів	101
III. Дослідження магнітострикції нікелю	103
13. Дослідження квазістаціонарних електричних систем	105
I. Визначення активного опору, індуктивності і ємності у колі змінного струму	106
II. Дослідження послідовного і паралельного резонансу в колі змінного струму	108
III. Вивчення лічильника електричної енергії	110
IV. Дослідження роботи трансформатора	113
14. Дослідження електромагнітних коливань	115
I. Вивчення роботи електронного осцилографа	115
II. Визначення логарифмічного декременту затухання коливального контура	120
15. Дослідження електромагнітних хвиль в двопровідній лінії	121

Розділ четвертий

Оптика

16. Фотометричне дослідження джерел світла	124
17. Визначення енергетичних оптичних величин зразків матеріалів за допомогою універсального фотометра	128
18. Вивчення інтерференції світла	132
I. Визначення довжини хвилі монохроматичного світла за допомогою інтерференції від двох щілин	133
II. Дослідження інтерференції світла за допомогою біпризми Френеля	134
III. Дослідження інтерференції світла за допомогою кільця Ньютонів	137
IV. Вивчення дефектів відбивних поверхонь за допомогою інтерферометра Лінника	139
19. Вивчення дифракції світла	142
I. Дослідження дифракційної картини від щілини	142
II. Вивчення дифракційної решітки	145
III. Визначення швидкості і довжини ультразвукових хвиль в рідинах оптичним методом	146
20. Вивчення поляризації світла	149
I. Визначення кута Брюстера	149
II. Перевірка закону Малюса	152
III. Визначення концентрації розчину цукру за допомогою поляриметра	153
IV. Дослідження оптичної анізотропії при механічних деформаціях	156
21. Вивчення геометричної теорії оптичних зображень	160
I. Визначення головної фокусної відстані збиральних і розсіювальних лінз	160
II. Визначення головної фокусної відстані сферичних дзеркал	164
III. Вивчення мікроскопа і зорової труби	166
IV. Визначення показника заломлення прозорих твердих тіл за допомогою мікроскопа	174
V. Визначення показника заломлення і середньої дисперсії твердих і рідких тіл	176
VI. Дослідження аберації лінз	182
22. Вивчення теплового випромінювання	185
I. Якісна перевірка закону Кірхгофа	187

II. Якісна перевірка закону зміщення Віна	189
III. Визначення сталої Стефана — Больцмана	190
IV. Визначення випромінювальної здатності вольфраму	191
23. Вивчення законів зовнішнього фотоэффекту	194
I. Дослідження зовнішнього фотоэффекту та визначення сталої Планка	196
II. Дослідження фотоелектронного помножувача ФЭУ-2	199
III. Дослідження багатокаскадного фотопомножувача ФЭУ-19М	200

Розділ п'ятий

Фізика атома, твердого тіла і атомного ядра

24. Вивчення ефекту Франка і Герца	201
25. Дослідження спектра випромінювання атомарного водню	204
26. Спектральний аналіз сплавів за допомогою стилметра	207
27. Дослідження лазера і вимірювання кута розходження світлового пучка	211
28. Вивчення основ явища люмінесценції	216
29. Дослідження ефекту Холла в напівпровідниках	219
30. Дослідження фотоелектричних властивостей напівпровідників	223
I. Визначення основних характеристик напівпровідникового фоторезистора	224
II. Визначення основних характеристик фотоелемента	226
31. Дослідження лічильника Гейгера — Мюллера	229
32. Статистичний характер радіоактивного розпаду. Розподіл Пуассона	233
33. Визначення періоду піврозпаду довгоживучого ізотопу	235
34. Визначення граничної енергії β -спектра радіоактивного ізотопу методом поглинання	238
35. Визначення енергії α -частинок за довжиною вільного пробігу у повітрі	241
Додаток	245
Список літератури	251

*Виктор Павлович Дущенко,
Валерій Михайлович Барановський,
Петр Васильевич Бережний,
Іван Тихонович Горбачук,
Николай Іванович Шут*

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Ч. 2

Под общей редакцией
профессора В. П. Дущенко

*Допущено Министерством просвещения УССР
в качестве учебного пособия
для студентов педагогических институтов*

Главное издательство
издательского объединения «Выща школа»
252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7

(На украинском языке)

Редактор Л. І. Попеначенко
Літредактор П. М. Гвоздецький
Художній редактор Є. В. Чурій
Технічний редактор І. І. Каткова
Коректор Н. І. Кунцевська

Информ. бланк № 6084

Здано до набору 27.05.83. Підп. до друку 20.12.83. Формат 60×90^{1/16}.
Папір кн.-журн. Літ. гарн. Вис. друк. 16 друк. 16,31 фарб.-відб. 17,43
обл.-вид. арк. Тираж 4500. пр. Вид. № 6201. Зам. № 3—1767. Ціна 75 к.

Головне видавництво
видавничого об'єднання «Вища школа»
252054, Київ-54, вул. Гоголівська, 7

Надруковано з матриць Головного підприємства респуб-
ліканського виробничого об'єднання «Поліграфкнига»
в Харківській міській друкарні № 16, м. Харків-3,
вул. Університетська, 16. Зам. 123.

**У Головному видавництві
видавничого об'єднання «Вища школа»
у 1984 році вийдуть
нові навчальні посібники для педінститутів:**

Теоретична фізика. Класична механіка. Керівник авт. кол. професор, доктор фіз.-мат. наук А. М. Федорченко. Мова українська. 15 арк. 70 к.

Посібник містить виклад курсу класичної механіки — складової частини теоретичної фізики. Особливу увагу приділено питанням методології класичної механіки, зокрема законам збереження та зв'язку їх із законами симетрії простору — часу, методам одержання інтегралів руху, принципу відносності тощо. Теоретичний матеріал супроводжується прикладами розв'язування задач. Наведено завдання для самостійної роботи.

Для студентів фізико-математичних факультетів.

Вища математика. У 2-х ч. Ч. 1. Керівник авт. кол. професор, доктор фіз.-мат. наук М. І. Шкіль. Мова українська. 30 арк. 65 к.

Посібник містить такі розділи: аналітична геометрія, математичний аналіз, зокрема вступ до аналізу, диференціальне та інтегральне числення функції однієї змінної.

Теоретичний матеріал викладено в доступній формі. Особливу увагу приділено практичному застосуванню теорії до розв'язування різних задач з механіки, фізики і техніки.

Для студентів, які навчаються з спеціальності «Загальнотехнічні дисципліни і праця».

ШАНОВНІ ТОВАРИШІ!

Ці книги можна замовити в магазинах облкниготоргів, облспоживспілок, а також у спеціалізованих магазинах «Книга — поштою».

НБ ПНУС



bn1529