

ВСТУП

Аналіз сучасного стану мікроелектроніки дозволяє зробити висновок про те, що з кінця 80-х – початку 90-х років одним з науково-технічних напрямів, що найбільш динамічно розвиваються, є розробка, дослідження і використання мікросистем.

В якості збірного поняття, що найбільш часто використовується для розширеного тлумачення напряму, пов'язаного із створенням мікросистем, в англomовній літературі застосовують скорочення MST (microsystem technology), що дослівно означає “технологія мікросистем”. Найбільше розповсюдження отримав термін “мікросистемна техніка (МСТ)” (microsystem engineering), який містився в документі “Нові пріоритети науки і техніки”, затвердженому урядовою комісією з науково-технічної політики.

Обсяг робіт по розробці, дослідженню і використанню МСТ в 2004 р. перевищив 30 млрд доларів і продовжує рости. Причому обсяг розробок в області систем подачі рідини і газу, аналітичних ДНК-чипів, оптичних і мікромеханічних ключів, мережних затворів і мікродвигунів в цьому ж році склав 9,8 млрд доларів. Такі країни як США, Японія, Німеччина мають національні програми теоретичних і прикладних робіт в даному напрямі.

Елементами мікросистемної техніки називають пристрої з інтегрованими в об'ємі або на поверхні твердого тіла електричними, оптичними і мікромеханічними структурами. Статична або динамічна сукупність цих структур забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії і механічного руху в інтеграції з процесами сприйняття, обробки, передачі і зберігання інформації, які діють в необхідних умовах експлуатації із заданими функціональними, енергетичними, часовими і надійнісними показниками.

В рамках даного напряму створюються мініатюрні чутливі (сенсорні) і виконавчі (актюаторні) системи, в основі функціонування яких лежить використання класичних принципів механіки, оптики, електротехніки і фізики твердого тіла.

Лідуючими організаціями в області розробки і дослідження елементної бази і засобів проектування МСТ є Berkeley Sensor & Actuator Center (BSAC), University of California (USA), Tanner Research (USA), Tima-CMP (France), Analog Devices (USA), Sandia National Laboratories (USA), Texas Instruments Inc. (USA), Московський інститут електронної техніки (Технічний університет, Росія), Центр мікротехнології і діагностики Санкт-Петербурзького державного електротехнічного університету (Росія) та ін.

1. Огляд сучасного стану і напрямків розвитку МСТ

Мікросистемна техніка є в даний час одним з міждисциплінарних науково-технічних напрямів, які найбільш динамічно розвиваються, що визначає нову революцію в області систем, які реалізуються на мікрорівні. Строго кажучи, мікросистемна техніка (МСТ) – це науково-технічний напрям, метою якого є створення в обмеженому об'ємі твердого тіла або на його поверхні мікросистем, що є впорядкованими композиціями областей із заданим

складом, структурою і геометрією, статична або динамічна сукупність яких забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії і руху в інтеграції з процесами сприйняття, обробки, трансляції і зберігання інформації при виконанні запрограмованих операцій і дій в необхідних умовах експлуатації із заданими функціональними, енергетичними, тимчасовими показниками і показниками надійності. Мікросистеми можуть забезпечувати виконання всіх вищеперелічених функцій або частини з них.

При цьому особливістю мікросистем нового покоління є необхідність забезпечення тривалої їх експлуатації при перенесенні енергії, заряду, інформації не тільки в умовах стаціонарного твердого тіла, але і коли об'єкт (частина об'єкту) мікросистемної техніки або середовище, що контактує з ним, знаходяться у взаємній просторово - часовій динаміці.

Разом з цим перехід на мікрорівень вимагає при створенні мікросистем різного функціонального призначення нового покоління врахування чинників масштабування, геометричних розмірів на властивості матеріалів, а також особливостей їх інтеграції в єдиному об'ємі з позицій кристалохімічної, термомеханічної, електромагнітної, хімічної сумісностей, теплової, електричної, механічної стійкості, стійкості до дії агресивних середовищ і радіації, а також часової стабільності.

За аналогією з мікроелектронікою, яка втілила свій теоретичний заділ в перших інтегральних мікросхемах, створених в 1958-1961 рр., в рамках реалізації цільової функції – поліпшення масогабаритних показників, надійності, швидкодії, відношення функціональної складності до вартості – основним замовником і фінансистом “ранніх” об'єктів МСТ (1975-1987 рр.) у вигляді мікроелектромеханічних приладів (датчиків тиску, акселерометрів) був авіаційно-космічний комплекс. Поява на ринку споживання автомобілебудівників остаточно сформулила вимоги до характеристик “класичних” виробів МСТ: масогабаритні показники, вартість, надійність, відтворюваність, масовість, номенклатура. Ініціюючим чинником в розвитку МСТ стала поява так званих мікроелектромеханічних систем (англійська аббревіатура MEMS – microelectromechanical systems), в яких гальванічні зв'язки знаходяться в тісній взаємодії з механічними.

Найбільш яскравими конструктивно-технологічними відмінними особливостями МСТ нового покоління є:

- активне використання третього вимірювання (3D-системи);
- інтеграція електричних і оптичних зв'язків з механічними;
- інтеграція фізико-хімічних і технологічних базисів мікро- і біотехнології;
- інтеграція виконувано-технологічних і контрольно-діагностичних процедур в мікрооб'єктах і на поверхні твердого тіла.

З середини 90-х років в якості найбільш часто використовуваного збірного поняття для розширеного тлумачення напряму, пов'язаного із створенням мікросистем, в англомовній літературі застосовують скорочення MST (microsystem technology), що дослівно означає “технологія мікросистем”. У Росії найбільшого поширення набув термін “мікросистемна техніка”.

Країни, які в сучасних умовах фактично визначають науково-технічний прогрес, використовують по відношенню до напрямку “мікросистемна техніка” терміни “критичні технології”, тим самим надаючи програмам статус національних, пріоритетних.

В даний час загальноприйнято, що МСТ має пріоритетне значення для оборонної технології, забезпечення ядерної та екологічної безпеки держави, розвитку біотехнологій та медичного обслуговування населення.

Тому, безперечно, даний напрямок є дуже перспективним для вивчення, дослідження та технологічних розробок.

2. Аналіз ринку МСТ

Інтеграція досягнень в галузі електроніки, механіки, інформатики і вимірювальної техніки, поєднаної тенденцією до мікромініатюризації, визначили зародження нових інтегральних мікросистемних технологій в кінці 80-х – початку 90-х років минулого століття. Величезна кількість університетів і комерційних компаній США і Японії сконцентрувала свої зусилля на розвитку технологій MEMS. Аналіз динаміки ринку MEMS, виконаний NEXUS (органом Європейської Комісії), показав, що об’єм ринку збільшується щорічно в середньому на 18 % і складає в даний час понад 40 млрд. доларів. Більш детально структура ринку MEMS приведена на рис. 1.

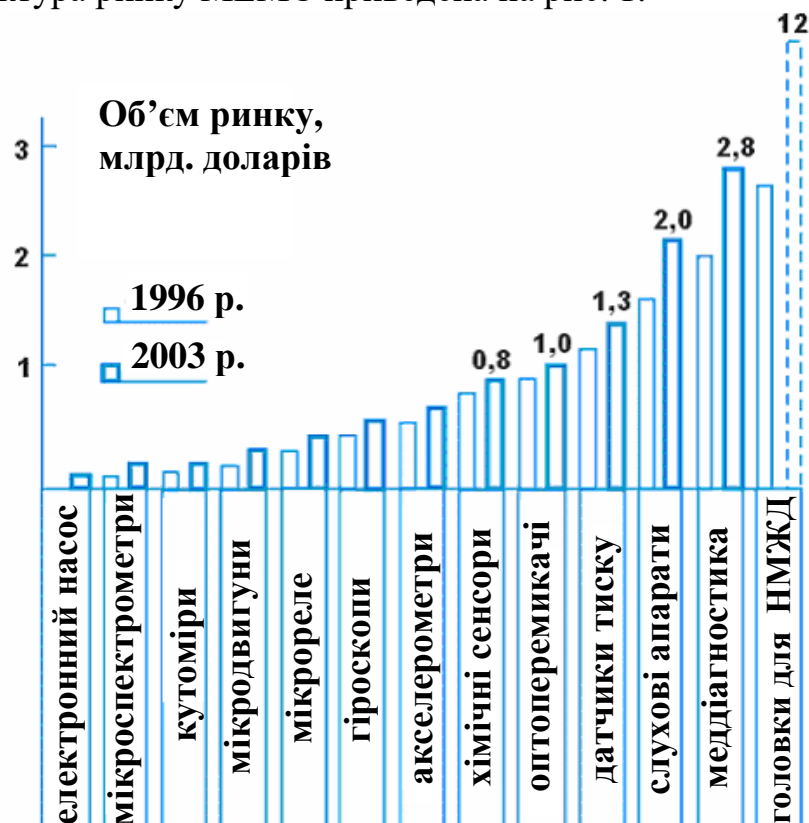


Рис. 1. Структура світового ринку мікросистемної техніки.

Необхідно відзначити, що за останні роки розроблені нові класи MEMS на основі кремнію, які забезпечили революційне впровадження нових технічних засобів мобільного зв’язку і оптоелектроніки, у тому числі:

1) Радіочастотні МЕМС-фільтри для мобільних телефонів, що забезпечують в діапазоні частот 3 ... 300 МГц високу добротність – 200 ... 300 (замість 20 ... 30 в мікроелектронному виконанні);

2) Мікродзеркальні комутатори (2 x 2,1 x 4 мм) для оптоволоконних каналів зв'язку на частоти 3 ... 30 ГГц.

У 90-ті роки ХХ століття до суперництва двох світових лідерів в області МЕМС (США і Японія) активно підключилися країни Європи і Південно-Східної Азії. Наприклад, кількість університетів і комерційних компаній, що займаються дослідженнями і розробкою в галузі створення МЕМС, в Німеччині до 1997 року стала в 1,5 рази більше, ніж в США і практично зрівнялося з Японією. В 1998 році за замовленням управління перспективних досліджень Міністерства оборони США вперше була прийнята програма по МЕМС, яка називалася “МЕМС – Microelektromechanical Systems”. На розвиток цієї програми США щорічно виділяло по 35 млн. доларів, що перевищує подібні інвестиції інших країн.

Узагальнюючи сучасний стан в області стимулів і чинників, які сприяють розвитку МСТ, можна виділити:

- наявність наукової і технологічної культури, що сформувалася в період становлення і розвитку мікро- і оптоелектроніки;

- наявність базового устаткування, виробничих потужностей і організаційної інфраструктури мікроелектронного виробництва, придатної для реалізації на них об'єктів МСТ;

- активний ринок сенсорних систем різного функціонального призначення і конструктивного виконання;

- тенденції до інтеграції процесів мікро- і біотехнології, принципів функціонування і матеріалів;

- поява на ринку систем обробки інформації і керування перспективного покоління інтегральних схем з нейроподібною структурою, що забезпечують новий рівень “інтелектуальних” можливостей і швидкодію мікросистем при збереженні або поліпшенні колишніх масогабаритних і енергетичних показників;

- перспективи нового активного ринку в області мініатюрних недорогих діагностичних систем контролю за життєдіяльністю людини на основі концепції економічної доцільності масової профілактики захворювання по відношенню до їх лікування;

- формування ринку устаткування для технологій на мікрорівні (крім мікроелектронних) за рахунок широкого розвитку біотехнології і посилення вимог до роботи з радіоактивними, токсичними, вибухонебезпечними речовинами, що визначає перехід на використання надмалих кількостей речовин в обмежених об'ємах.

В даний час загальновизнано, що МСТ має пріоритетне значення для оборонної промисловості, забезпечення ядерної і екологічної безпеки держави, розвитку біотехнології і медичного обслуговування населення.

Створювана в рамках напряму “мікросистемна техніка” продукція характеризується:

- новизною;

- наукоємкістю;

- конкурентоспроможністю;
- низькою енергоємністю;
- широким ринком споживання.

Ефект від реалізації робіт в області мікросистемної техніки визначається:

- створенням приладів і машин нового покоління з низькою матеріало- і енергоємністю, які забезпечують рішення традиційних і раніше неприступних задач в умовах скорочення необхідних робочих площ, зниження екологічного впливу на оточуюче середовище, підвищення безпеки роботи людини;
- використанням інтегрально-групових принципів виробництва, що створюють передумову до зниження собівартості продукції, яка стає доступною широкому колу споживачів, включаючи сфери науки, освіти, медицини, малого і середнього бізнесу;
- широким використанням при створенні технологічних мікросистем стандартного устаткування мікроелектронного виробництва, яке в даний час, в Україні, як правило, не розвивається за прямим призначенням;
- можливістю реалізації раніше неприступних процесів в умовах мікрооб'єктів і при використанні надмалих кількостей речовин, що зменшує витрати на стадії проведення досліджень і знижує потребу в дорогих матеріалах;
- високою ефективністю аналітико-діагностичних мікросистем в умовах вирішення задач по профілактиці захворювань, тобто збереженню “людського капіталу”.

3. Основні напрямки і особливості розвитку виробів МСТ

В наш час найбільш поширеною базою є КМОН- технології і структури на цій основі для створення МСТ. В табл. 1 представлені основні напрями розвитку виробів МСТ.

Таблиця 1. Основні напрями і особливості розвитку виробів МСТ

Найменування	Країна	Розробник	Особливості	Примітка
SEMS – Sandia Embedded Micromechanical Systems	США	Лабораторія “Сандія”	Розроблена технологія забезпечує створення МЕМС з мінімальною топологією 0,5 мкм	У лабораторії організовані відділення робототехніки і штучного інтелекту
Оптичний перемикач-мультиплексор	США	Лабораторія “Сандія”	Виконаний на основі МЕМС з набором з 250 мікродзеркал за технологією SUMMIT-Vsurface MEMS	Готується перемикач, що складається з 1000 мікродзеркал
Чутливі елементи датчиків на основі карбіду кремнію	СНД	ЛЕТІ	Датчики забезпечують лінійність вимірювальних характеристик до температури 450°C	Аналогічні зарубіжні кремнієві прилади забезпечують максимальну температуру до 125°C

Мікроелектро-механічний спектрограф	США	Окріджська лабораторія	Має об'єм 6 см ³ , що в три тисячі раз менше його неінтегрального аналога	Може застосовуватися в моніторингових і аварійних системах безпеки хімічних підприємств
Прототип ЛНК ("Лабораторії на кристалі")	США	Массачусетський технологічний інститут	Містить 34 мікрорезервуари по 24 нм, сформовані методом наскрізного травлення кремнієвих підкладок і закритих золотими мембранами завтовшки 0,3 мкм	За оцінкою фахівців, може привести до революції в приладобудуванні (для аналізу ДНК людини або контролю шкідливих речовин)
Особливо стійкі МЕМС	США	Ліверморська лабораторія	Розроблені МЕМС забезпечують особливу стійкість до радіаційних, хімічних і теплових дій	Отримання особливо стійких МЕМС забезпечується використанням карбиду кремнію як вихідного матеріалу
Мініатюрний літальний апарат "Black Widow"	США	Кооперація організацій і фірм	Розмах крил – 15 см; вага – 80 г; висота польоту – 230 м; швидкість – 70 км/год; час польоту – 30 хв; ККД двигуна – 82 %; дві відеокамери по 2 г кожна	Забезпечує передачу відеозображення на відстань до 2 км в реальному масштабі часу

Аналіз сучасного ринку устаткування для МСТ показує, що останній формується за рахунок активного розвитку біотехнології на фоні боротьби з тероризмом, посилення вимог до роботи з радіоактивними, токсичними і вибухонебезпечними речовинами, що викликає перехід на використання малих кількостей речовин в обмежених об'ємах і створення "лабораторій на кристалі" і біокристалів. Можливі напрями використання технічних засобів МЕМС і МСТ для вирішення спеціальних задач приведені в табл. 2.

Таблиця 2. Можливі напрями використання МЕМС в спеціальній техніці

МСТ	Напрямок розробок	Напрямок використання в спеціальній техніці
Мікроелектромеханічні системи і машини	Мікромеханізми, мікропривід, мікродвигуни	Спеціальна робототехніка
Оптико-механічні мікросистеми	Мікрооптика, оптико-механічні інтегральні схеми	Спецзв'язок, акустичний контроль та ін.
Біотехнічні мікросистеми	Мініатюрні автономні системи для діагностики організму і заміщення органів	Спеціальні засоби антитерору

Мікросистеми енергозабезпечення	Автономні мініатюрні джерела енергії, мікротурбіни, мікросистеми рекуперації енергії	Спеціальні технічні засоби
Сенсорні мікросистеми	Мультисенсори, інтелектуальні сенсори, сенсори із зворотнім зв'язком	Захист інформації, об'єктів і особи
Мікроаналітичні системи	Мініатюрні аналітичні прилади	Сучасні криміналістичні засоби
Технологічні мікросистеми	Мікрореактори, мікроінструмент, мікрорегулятори, мікронасоси	Спеціальний інструмент
Міні- і мікро-робототехнічні системи	Автономні багатофункціональні діагностичні і технологічні міні-системи спеціальних умов експлуатації	Спеціальна робототехніка

Необхідно відзначити, що активному розвитку МСТ сприяють три основні обставини:

1) наявність базового устаткування, виробничих потужностей і організаційної інфраструктури мікроелектронного виробництва, придатної для реалізації на них об'єктів МСТ (при існуючому рівні технології в 1 ... 10 мкм);

2) наявність наукової і технологічної культури (в першу чергу, в області мікро- і оптоелектроніки);

3) обширний ринок сенсорних систем різного напрямку (у тому числі, в галузі забезпечення безпеки).

Як вже вказувалося вище, в становленні MEMS найбільший вплив зробив процес інтеграції сучасних засобів, систем і технологій. Тому для оцінки перспектив розвитку MEMS скористаємося коефіцієнтом рівня інтеграції

$$K = T \cdot M,$$

де T – число транзисторів, а M – число механічних компонент. Стан і перспективи інтеграції МСТ показано на рис. 2.

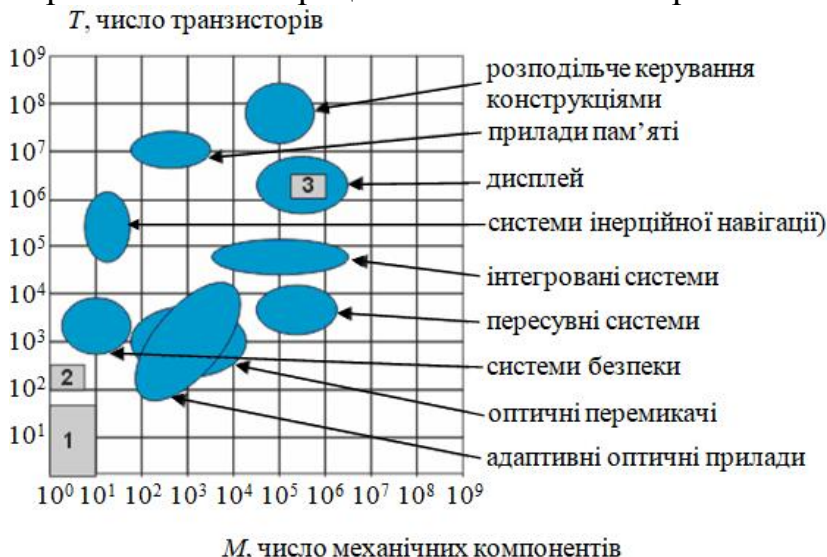


Рис. 2. Стан і перспективи інтеграції МСТ: 1 – більшість існуючих MEMS; 2 – акселерометр ADXL-50; 3 – оптомеханічні дисплеї DMD.

Представлений рисунок добре ілюструє інтеграційні можливості мікросистемної техніки. Так наприклад, для акселерометра ADXL-50, що серійно випускається і виготовляється за технологією з топологічними нормами 2-10 мкм (що містить 100...200 транзисторів і 1 механічний елемент) коефіцієнт інтеграції $T \cdot M = 10^2$, а для кристала мікродзеркального дисплея (1млн. механічних елементів екрану і 1 млн. керуючих транзисторів) одержимо $T \cdot M = 10^{12}$. Аналогічно побудовані й інші області інтеграції.

4. Використання мікросистемних технологій

Застосування мікросистемних технологій дає можливість отримати ряд переваг, а саме:

- мініатюризація: заощадження матеріалів, заощадження потужності, менший час спрацювання, краща продуктивність;
- інтеграція: інтеграція з ІС та іншими системами, зменшення розмірів системи, витрат, швидкі нейросистеми, адаптери, проводи взаємозв'язку і т.д.;
- групове виробництво: дешево, доступно.
- наближення мікросвіту, якого досі не спостерігалось, можливість мініатюризувати біомедичні системи, катетери тощо.

МЕМС класифікують за принципом дії:

► Механічні перетворювачі:

- ☐ механічні датчики: прилади для вимірювання напруг, акселерометри, гіроскопи, датчики тиску, датчики дотику;
- ☐ механічні актюатори: електростатичні, теплові, сплав пам'яті форми, пневматичні, гідравлічні, п'єзоелектричні, магнітні, хімічні;
- ☐ механічні контури (схеми): механічні резонатори, реле, ВЧ-перемикачі;

► Оптичні перетворювачі:

- ☐ оптичні датчики:

1.прямого вимірювання: фотопровідні датчики (керовані фотодатчики), фотодетектори на *p-n*-переходах, ємнісні фотодатчики;

2. непрямого вимірювання:

- ☐ теплові оптичні детектори;
- ☐ оптичні актюатори: світлові емітери, світлові модулятори (рідкокристалічні дисплеї, відображаючі мікромеханічні модулятори світла, передавальні мікромеханічні модулятори світла);
- ☐ оптичні структури: волоконні оптопари, відбиваючі компоненти (дзеркала), передавальні компоненти (хвилеводи, лінзи), фільтри, інтегровані оптичні системи;

► Теплові перетворювачі:

- ☐ датчики температури: теплорезистивні, термопари, контактні (перехідні) теплодатчики, акустичні, тунельні;
- ☐ теплові датчики: теплові газові датчики тиску (газу), датчики потоку (струму, дефектів), датчики вологості;
- ☐ теплові актюатори: рефрижератори, кулери, теплові насоси на ефекті Пельтьє;

▢ Магнітні перетворювачі:

□ магнітні сенсори: на ефекті Холла, на доменних носіях, тунельні, електронно-вакуумні;

□ магнітні актюатори: мотори, детектори вихорів, магнітні головки запису-зчитування;

□ електромагнітні мікроприлади: котушки індуктивності (індуктори);

▢ Хімічні і біологічні перетворювачі:

□ хімічні сенсори: пасивні хімічні сенсори, електрохімічні перетворювачі, датчики акустичних хвиль, біодатчики, хімічні датчики;

□ хімічні актюатори: електрохімічні актюатори, полімерні механічні актюатори, тонкоплівкові батареї;

□ біоелектричні інтерфейсні (погоджувальні) пристрої: проникливі мікрозонди, нейроелектроди відновлення, розвинені клітинні системи (культивовані);

▢ Рідинні пристрої:

□ потокові канали, змішувачі, дифузні екстрактори, рідинні підсилювачі і логіка, насоси, клапани (вентилі), розділювачі (сепаратори), крапельні генератори, фільтри, пастки, взаємозв'язувачі;

□ рідинні датчики: датчики потоку, датчики в'язкості, густини;

▢ Перетворювачі іонізуючої радіації:

□ детектори радіації.

5. Проектування мікросистем

Знання, які потрібні для проектування мікросистем, можна окреслити наступною схемою (рис. 3).

Цикли проектування МЕМС та інтегральних схем відрізняються між собою як тривалістю, так і можливістю внесення змін (рис. 4, 5).

Процес проектування ІС вибирається з обмеженням технології (МОН, біполярна), топологія є єдиною змінною проектування. Типовий час циклу – 3-6 місяців.

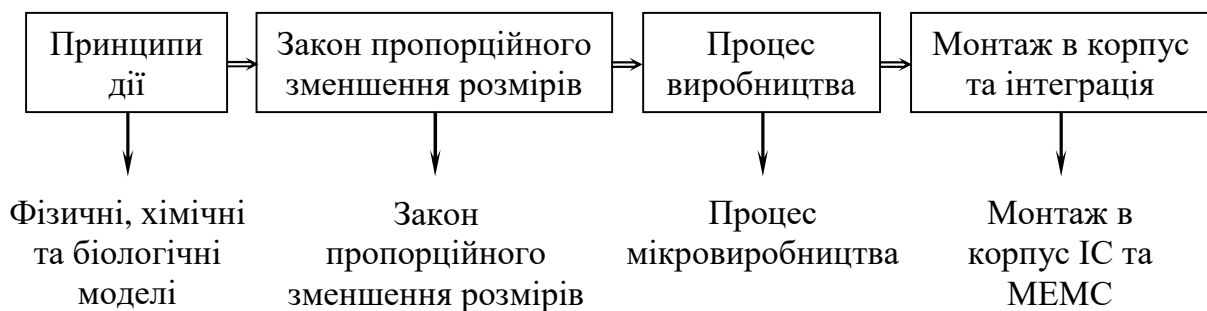


Рис. 3. Типова схема проектування мікросистем

Простір проектування МЕМС є широко відкритий, завжди доступний для змін. Типовий час циклу – 6-12 місяців.

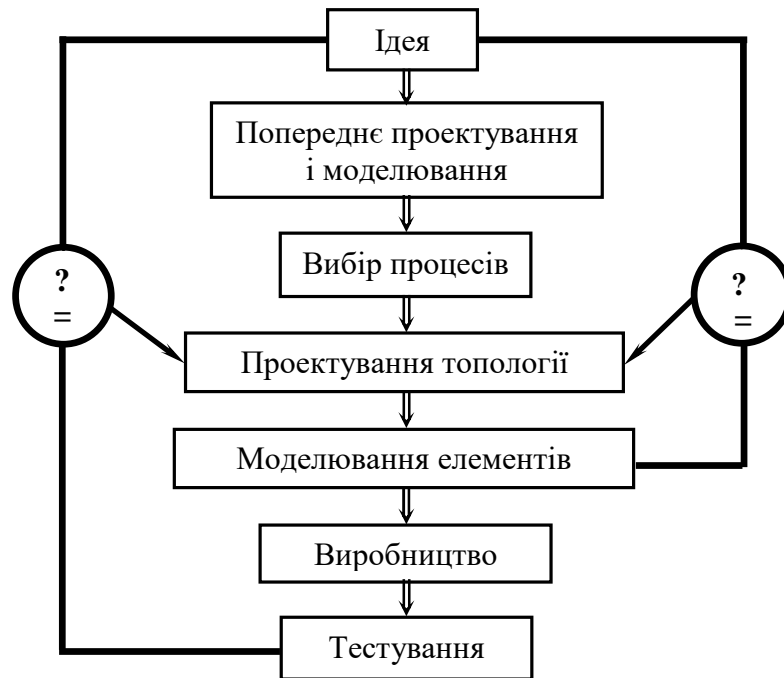


Рис. 4. Типовий цикл проектування інтегральних схем

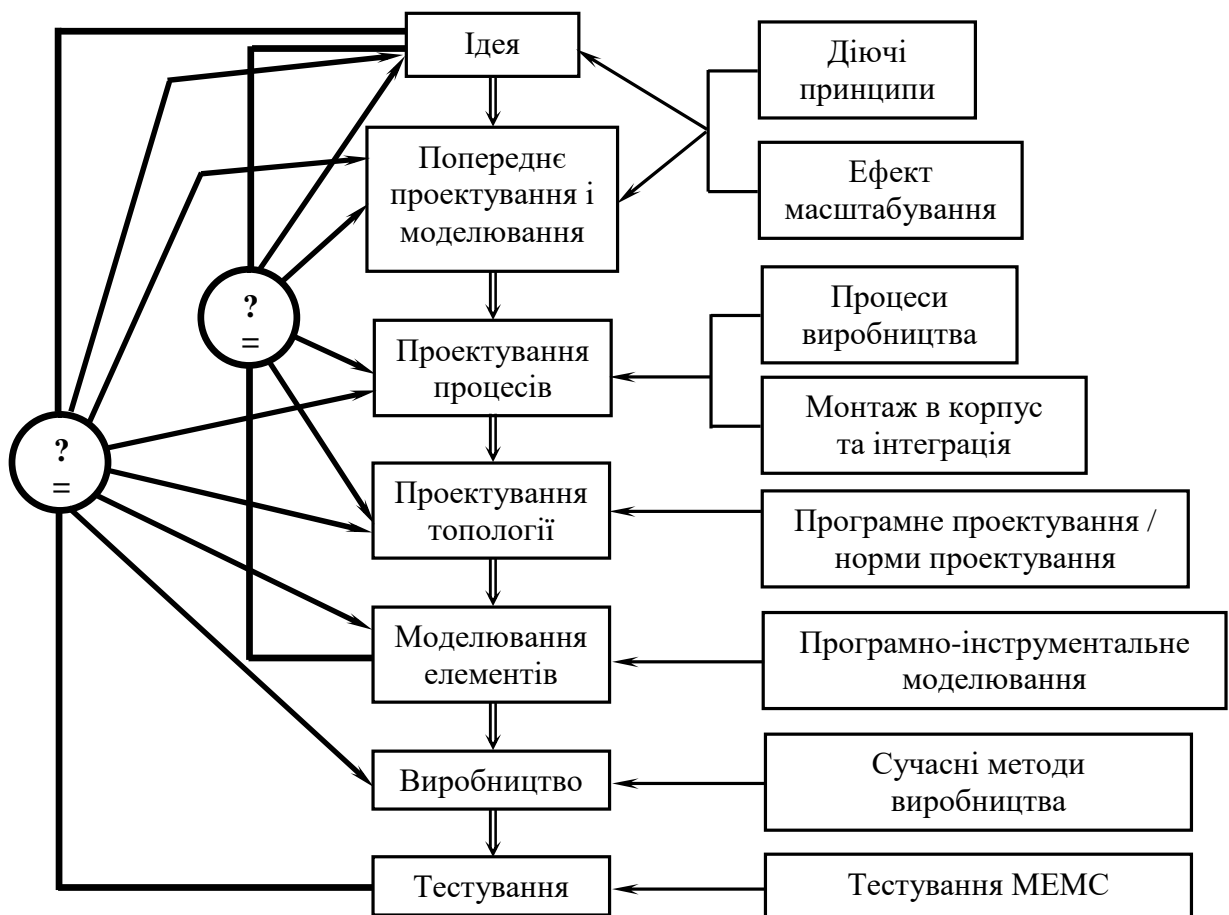


Рис. 5. Типовий цикл проектування МЕМС

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Элементы микросистемной техники представляют собой сформированные на одной подложке сенсорные и актюаторные устройства, схемы управления, приема, обработки и передачи информации. В отличие от типовых элементов планарных интегральных схем (ИС) элементы МСТ имеют трехмерную структуру [7-10].

Для изготовления элементов МСТ применяют технологические операции, которые используются в микроэлектронике: окисление, фотолитография, травление, легирование, металлизация и т.д. А также специально разработанные технологические операции – анизотропное и селективное травление для формирования структур, метод анодной сварки или плавления для соединения пластин [7-29]. Однако при сходстве процессов изготовления элементов ИС и МСТ между ними существуют различия, которые связаны с различными требованиями к геометрическим размерам элементов. В табл.1.1 приведены типовые размеры элементов ИС и МСТ и их технологические нормы изготовления [7-29].

Таблица 1.1

Топологические размеры и технологические нормы изготовления
элементов ИС и МСТ

Параметр	Элементы ИС	Элементы МСТ
Толщина пленки, мкм	< 1	1 – 6
Аспектное отношение	2 : 1	6 : 1
Топографический шаг, мкм	< 1	2 – 10
Типовой размер элемента, мкм	1	100

К стандартным технологиям микромеханической обработки (микрообработки), применяемых при изготовлении интегральных элементов микросистемной техники, можно отнести переднестороннюю объемную микрообработку, заднестороннюю объемную микрообработку, комбинацию передне- и заднесторонних объемных методов изготовления, поверхностную микрообработку, LIGA-технологии, MUMPs-технологии и SUMMiT-технологии [7-29].

Рассмотрим основные достоинства и недостатки перечисленных выше технологий микрообработки, применяемых при изготовлении сенсорных и актюаторных элементов МСТ.

1.1. Технология объемной микрообработки

Переднесторонняя объемная микрообработка основана на селективном травлении передней (лицевой) поверхности подложки. Основным достоинством объемной микрообработки является формирование интегральных элементов МСТ селективным травлением на последнем этапе процесса изготовления, непосредственно в объеме подложки.

В качестве маски при травлении могут быть использованы металлизированные или пассивирующие слои [10-16].

На рис.1.1 приведена консольная балка, изготовленная по технологии переднесторонней объемной микрообработки.

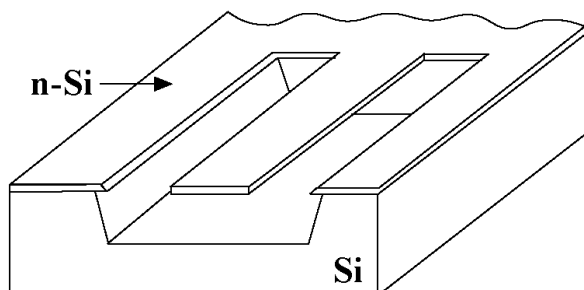


Рис.1.1. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью переднесторонней объемной микрообработки

Заднесторонняя объемная микрообработка основана на травлении подложки с задней стороны. Существуют два способа изготовления сенсорных и актюаторных элементов при заднесторонней объемной микрообработке [7-16]. При первом способе создания элементов МСТ на переднюю сторону подложки наносится эпитаксиальный слой, выполняющий функцию стоп-слоя, и выполняется добавочное маскирование задней стороны подложки. Далее, производится селективное травление задней стороны подложки до стоп-слоя.

На рис.1.2 приведена мембрана, изготовленная с помощью селективного травления заднесторонней объемной микрообработки с использованием стоп-слоя.

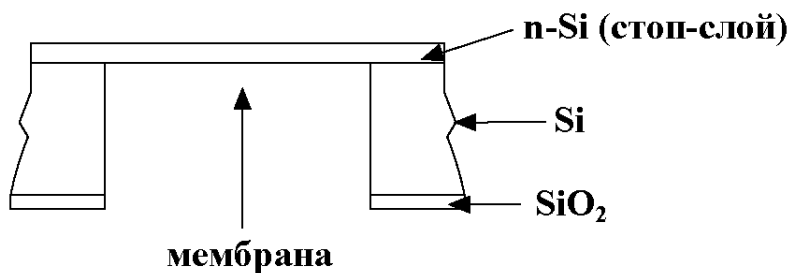


Рис.1.2. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью заднесторонней объемной микрообработки

При применении данного способа селективного травления заднесторонней микрообработки, необходимо обеспечить высокую селективность системы подложка – стоп-слой.

Данная техника изготовления позволяет стравливать до нескольких сотен микрон материала подложки и останавливаться на глубине, точно определенной стоп-слоем. Таким образом, данная техника изготовления позволяет со-

здавать элементы МСТ с маленькой толщиной [12-14].

При втором способе создания сенсорных и актюаторных элементов используются специальные управляющие отверстия, которые первоначально создаются с передней стороны подложки, а также выполняется добавочное маскирование задней стороны подложки. Глубина управляющих отверстий определяет толщину создаваемых элементов МСТ. Травление останавливается, когда переднесторонние управляющие отверстия становятся видимыми.

На рис.1.3 приведена мембрана, изготовленная по методу заднесторонней объемной микрообработки с управляющими отверстиями.

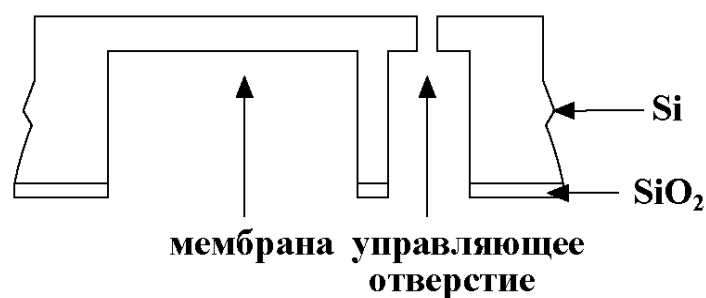


Рис.1.3. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью заднесторонней объемной микрообработки

Данная техника изготовления позволяет создавать элементы МСТ большой толщины непосредственно в подложке. Существенным недостатком данного способа изготовления является невозможность создания структур сенсорных и актюаторных элементов с маленькой толщиной [12-16].

Комбинированный метод объемной микрообработки основан на использовании переднесторонней и заднесторонней объемных технологий изготовления элементов МСТ.

На рис.1.4 приведена мембрана, изготовленная по методу комбинированной объемной микрообработки.

При применении технологии объемной микрообработки используются изотропное и анизотропное травление материала подложки [12-16].

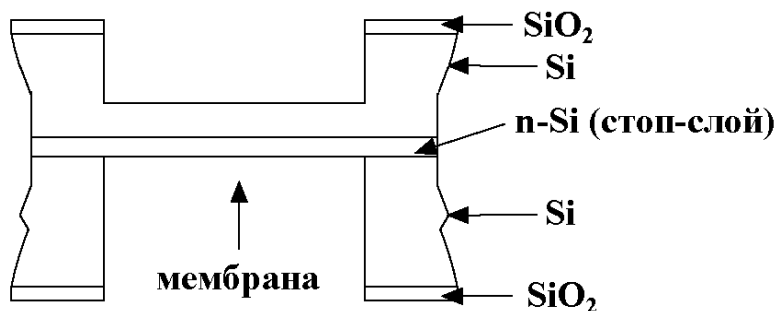


Рис.1.4. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью комбинированной объемной микрообработки

Изотропное травление является одним из самых известных и распространенных способов локальной микрообработки. Характерной особенностью изотропного травления является тот факт, что кристаллографическая ориентация подложки не влияет на профиль травления [12-16].

На рис.1.5 приведен пример объемной микрообработки подложки из монокристаллического кремния с помощью изотропного травления [12].

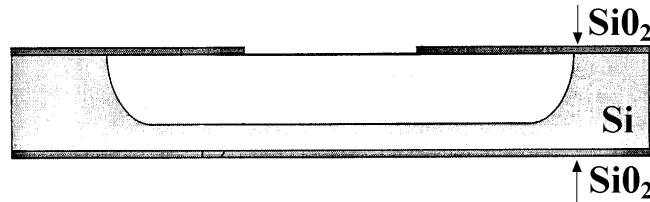


Рис.1.5. Пример объемной микрообработки при изотропном травлении

В качестве изотропных травителей используются травители на основе плавиковой и азотной кислот. Медный травитель содержит $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$ (7 : 1 : 3) и используется для получения мелких рельефов при скорости травления около 0,1 мкм/мин. Быстрый травитель имеет такой же состав, но в соотношении (3 : 1 : 1) и используется для получения глубоких рельефов при скорости около 4-8 мкм/мин [12].

Скорость травления подложки зависит от большого числа факторов: тип травителя, его температура; скорость отвода продуктов травления, наличие или отсутствие дефектов в материале подложки и т.д. Большинство этих факторов плохо поддаются контролю. Таким образом, невоспроизводимость скорости травления вносит основной вклад в невоспроизводимость геометрии микромеханических элементов МСТ [12,16].

Специфическая форма объемной микрообработки, а также сложность обеспечения локальной защиты от длительного воздействия травителя не позволяет рассматривать изотропное травление как перспективный способ микрообработки [12].

В процессе анизотропного травления удаление материала подложки происходит с разной скоростью в зависимости от кристаллографической ориентации подложки. Это объясняется различной плотностью упаковки атомов в разных плоскостях, а также различным характером связи поверхностных атомов между собой и с атомами, расположенными в объеме подложки. Скорость травления в зависимости от кристаллографического направления соответствует следующему ряду [12]:

$$V_{\langle 100 \rangle} < V_{\langle 110 \rangle} < V_{\langle 210 \rangle} < V_{\langle 211 \rangle} < V_{\langle 221 \rangle} < V_{\langle 111 \rangle}. \quad (1.1)$$

Для получения микромеханических структур элементов МСТ подложки чаще всего ориентируют в плоскостях $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ [12].

Типичное значение отношения скорости травления в направлении $\langle 100 \rangle$ к скорости травления в направлении $\langle 111 \rangle$ составляет [12]:

$$V_{\langle 100 \rangle} : V_{\langle 111 \rangle} = 400 \pm 1. \quad (1.2)$$

Анизотропные травители представляют собой многокомпонентные

растворы, состоящие из окислителя кремния до гидратированной двуокиси, растворителя ее и замедлителя или ускорителя процесса травления [12,14].

Процесс анизотропного травления представляет собой поэтапное удаление атомных слоев с поверхности подложки, т.е. в процессе травления на поверхности подложки образуются микроскопические ступеньки. Таким образом, анизотропное травление не дает зеркальных поверхностей и микромеханическая структура обрабатывается в течение 30 секунд в полирующем растворе изотропного травителя, состоящего из смеси плавиковой, уксусной и азотной кислот в пропорции 1 : 1,2 : 6,2. Полирующий раствор устраняет микрошероховатость поверхности, что повышает предел прочности микромеханических структур элементов МТС в 3-4 раза [12].

На рис.1.6 приведены примеры объемной микрообработки монокристаллического кремния с помощью анизотропного травления.

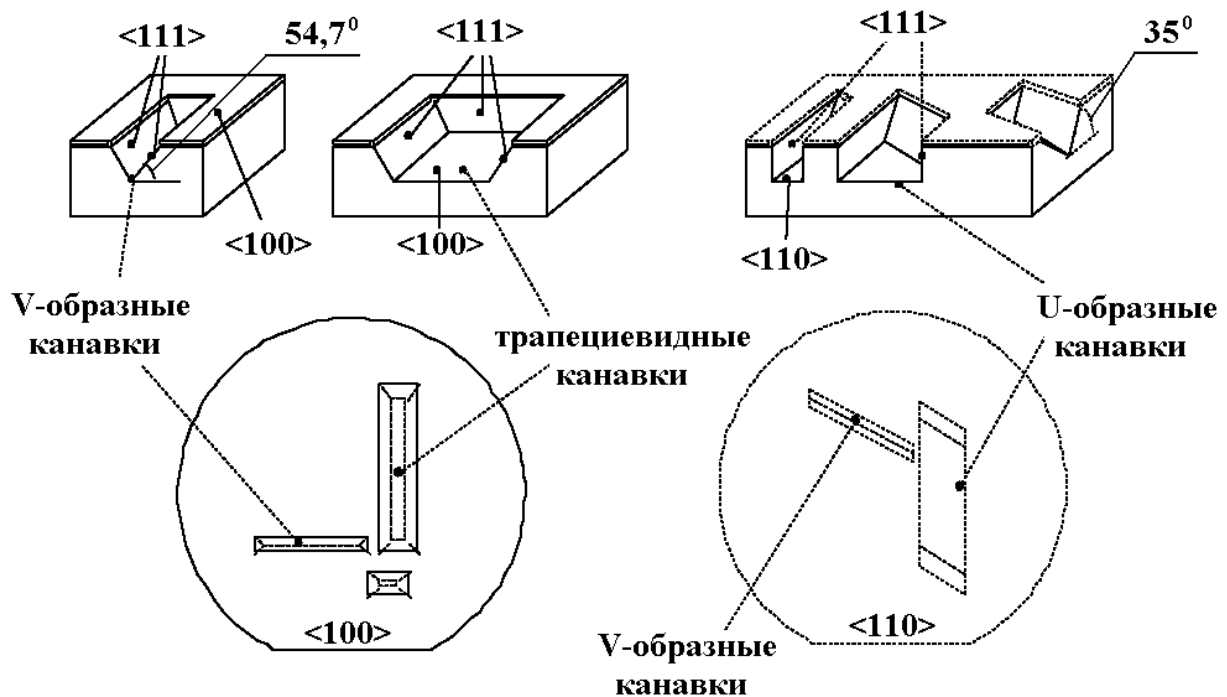


Рис.1.6. Анизотропное травление подложки в плоскостях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$

Возможность получения практически перпендикулярных боковых стенок позволяет экономить площадь подложки более чем на 30% [12-16].

По сравнению с изотропным травлением монокристаллического кремния травление поликристаллического кремния приводит к несколько худшей воспроизводимости формы микромеханических структур элементов МСТ из-за существенно большей неоднородности поликристалла. Однако, по сравнению с изотропным травлением, этот процесс характеризуется определенной направленностью. Боковое подтравливание под край маски происходит медленнее, чем травление в глубину. Форма получаемого при травлении поликремния профиля приведена на рис.1.7 [12].

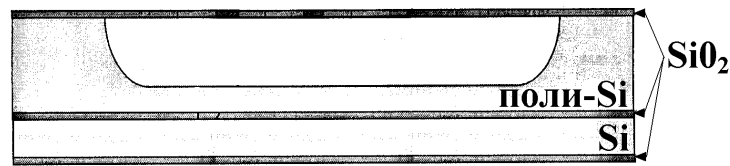


Рис.1.7. Форма профиля при травлении поликремния

Технология объемной микрообработки имеет ограничения в возможности создания поверхностных топологических фигур сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники, поскольку их конфигурация определяет и объемный результат травления (наклон стенок и глубину травления) [12-16].

1.2. LIGA-технология

Основными технологическими операциями в процессе изготовления элементов микросистемной техники, как и в ИС, являются литография и травление. Но при изготовлении элементов ИС основной задачей является смещение процесса литографии в субмикронную область, тогда как при изготовлении элементов МСТ – достижение большей глубины трехмерного рельефа топологического рисунка [17,19].

Для получения высоких аспектных отношений микромеханических структур элементов МСТ (от 50 : 1 до 100 : 1 при существующем современном уровне 6 : 1 (см. табл.1.1)) используется LIGA-технология [17-25].

LIGA-технология (аббревиатура немецких слов: **L**ithographie (литография), **G**alvanoformung (гальваноосаждение) и **A**bformung (микроформирование)), основанная на последовательности процессов литографии, гальваноосаждения и микроформирования, предлагает широкий спектр материалов для создания ультраточных трехмерных элементов МСТ с вертикальными боковыми сторонами, толщиной до 100-1000 мкм и поперечными размерами в пределах нескольких микрон [17-25].

Для достижения большей толщины (высоты) элементов микросистемной техники используется толстый слой резиста, наносимый на подложку. В качестве абсорбента используется золото, наносимое на тонкую пластину. Создание фотоэлектронного рисунка в резисте производится с использованием рентгеновских лучей от синхротрона, которые проходят через толстый слой резиста с очень маленькой боковой экспозицией. Синхротронное излучение имеет сверхмалый угол расходимости пучка ($0,006^\circ$), т.е. формируется пучок параллельных лучей [17,20].

Существуют некоторые вариации LIGA-технологии, когда дорогостоящая рентгенолитография заменяется электронно-лучевой или лазерной литографией [20].

На рис.1.8 приведены основные этапы изготовления микромеханической структуры элемента МСТ на основе LIGA-технологии [17,20].

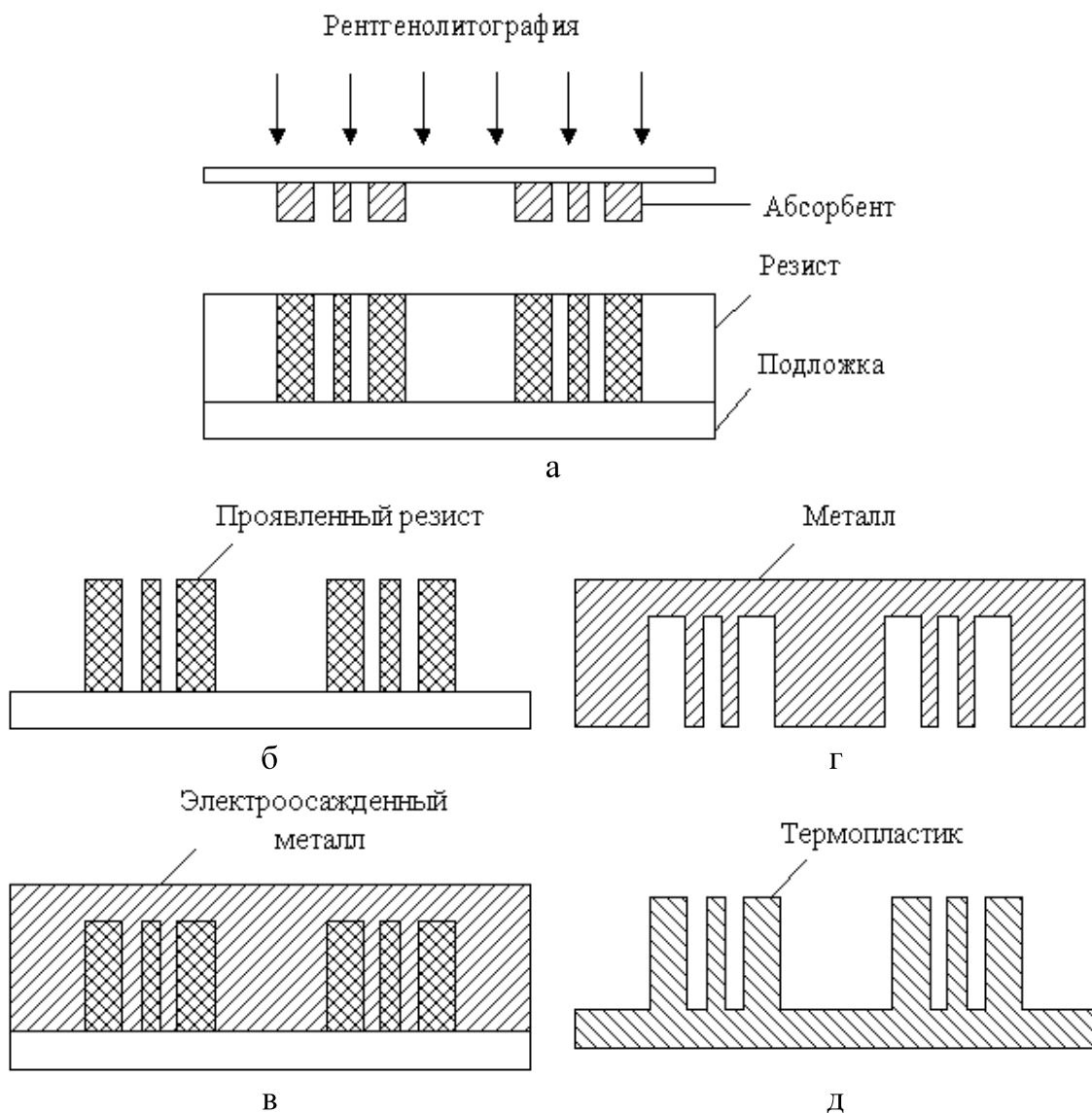


Рис.1.8. Основные этапы изготовления элементов МСТ с использованием LIGA-технологии:

- а – создание фотоэлектронного рисунка элемента МСТ в резисте;
- б – проявление резиста;
- в – гальваноосаждение металла;
- г – формирование шаблона;
- д – формирование микромеханической структуры элементов МСТ

Процесс изготовления микромеханических структур элементов МСТ начинается с создания фотоэлектронного рисунка в резисте (см. рис.1.8,а). Последующее проявление резиста (см. рис.1.8,б) и гальваноосаждение металла

позволяют получить металлическую микроструктуру (см. рис.1.8,в.). После удаления резиста металлическая микроструктура может быть использована либо непосредственно в качестве микромеханической структуры элементов МСТ (см. рис.1.8,г), либо применена в качестве формы (шаблона) для изготовления микромеханических структур сенсорных и актюаторных элементов из термопластика, смол или керамики (см. рис.1.8,д).

В процессе гальваноосаждения применяются как стандартные материалы и сплавы, используемые в полупроводниковой промышленности, так и новые разработанные материалы и сплавы.

В табл.1.2 приведены материалы, используемые в процессе гальваноосаждения в LIGA-технологии [21-24].

Таблица 1.2

Материалы, используемые для формирования
элементов МСТ в LIGA-технологии

Применения	Материалы		Сплавы	
	Стандартные	Новые	Стандартные	Новые
Формовка	Ni, Cu	-	Ni-Co	Ni-W, Co-W
Абсорбенты для рентгенолитографии	Au	-	-	-
Микромеханизмы	Ni		Ni-Co, Ni-P	Ni-B
Актюаторные элементы	Fe	-	Ni-Fe	-
Сенсорные элементы	-	Pd	-	Ni-W
Жертвенные слои	Cu, Zn	-	-	-
Функциональное покрытие	Ag, Au, Cu, Zn	Cr, Pd	-	Cu-Zn
Электрические контакты	Au, Cu	Pd	-	-
Другие	Ag, Cu	-	-	Sm-Co

Достоинством LIGA-технологии является возможность создания элементов МСТ большой толщины с вертикальными сторонами. А также возможность создания сенсорных и актюаторных элементов из различных материалов – металла, пластика и керамики.

Основными недостатками данной технологии является необходимость использования уникальных источников синхротронного излучения и нетрадиционность технологии, связанная с гальванопластикой на микроуровне. Кроме того, наличие в процессе изготовления элементов МСТ операции микросборки не позволяет использовать LIGA-технологию для их группового изготовления.

1.3. Технология поверхностной микрообработки

Поверхностная микрообработка позволяет изготавливать сенсорные и актюаторные элементы МСТ меньшей толщины, чем аналогичные структуры изготовленные с использованием объемной микрообработки [26,27].

Поверхностная микрообработка основана на осаждении тонких слоев на поверхности подложки и травлении одного или нескольких слоев для освобождения структуры. Удаляемые слои называются жертвенными. Освобождение подвижных частей (структурных слоев) сенсорных и актюаторных элементов (удаление жертвенных слоев) производится на последнем этапе процесса изготовления [26,27].

В качестве жертвенных слоев могут быть использованы следующие материалы: SiO_2 , Si_3N_4 , GaAs, AlGaAs, Al, фосфоросиликатное стекло (ФСС, PSG), боросиликатное стекло (БСС, BSG), AlN и т.д. [26,27].

На рис.1.9 приведен интегральный сенсор давления емкостного типа, изготовленный по технологии поверхностной микрообработки.

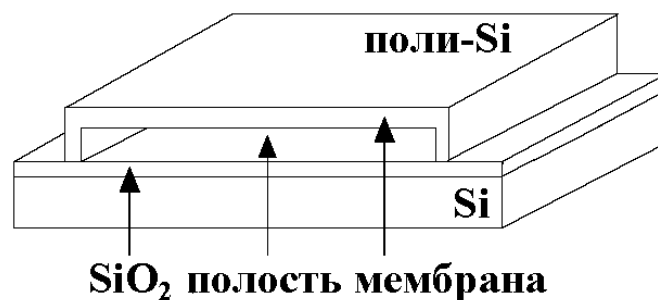


Рис.1.9. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью технологии поверхностной микрообработки

Механические свойства материалов, используемых в качестве структурных слоев элементов МСТ, приведены в табл.1.3 [26,27].

Таблица 1.3

Механические свойства структурных материалов

Структурный материал	Модуль Юнга (E), ГПа	Модуль сдвига (G), ГПа	Коэфф. Пуассона, (μ)	Плотность (ρ), кг/м ³
Кремний (Si)	130	50	0,28	2320
Поликремний (poly Si)	169	69	0,22	2100
Карбид кремния (SiC)	270	103	0,31	3200
Оксид кремния (SiO_2)	75	32	0,17	2190
Нитрид кремния (Si_3N_4)	270	106	0,27	3440

К достоинствам технологии поверхностной микрообработки можно отнести возможность создания большого количества различных сенсорных и актюаторных элементов МСТ в одном и том же процессе изготовления при незначительных изменениях и совместимости с технологией ИС.

К недостаткам технологии поверхностной микрообработки следует отнести прилипание тонких подвешенных частей элементов МСТ к подложке, возникающее в процессе промывания продуктов травления жертвенных слоев и при работе элемента.

1.4. MUMPs-технология

MUMPs-технология (**M**ulti **U**ser **M**EMS **P**rocess) представляет собой трехслойный поликремниевый процесс стандартной технологии поверхностной микрообработки, разработанный в начале 1990-х годов в Berkeley Sensor & Actuator Center, University of California (USA) [28,29].

MUMPs-технология является коммерческой программой, поддерживаемой большинством предприятий полупроводниковой промышленности, университетов и лабораторий, специализирующихся на разработке и производстве микросистемной техники.

Процесс MUMPs-технологии состоит из создания слоя изоляции Si_3N_4 , осажденного слоя поликремния (poly0), двух структурных слоев поликремния (poly1 и poly2), двух жертвенных слоев (ox1 и ox2) и одного слоя металла (metal). В качестве жертвенных слоев могут быть использованы те же материалы, что и в технологии поверхностной микрообработки. Первый слой (poly0) поликремния представляет собой жесткую плату, на которой располагаются подвижные части элементов МСТ, построенные на основе остальных двух поликремниевых слоев (poly1 и poly2) [28].

Проблема прилипания подвешенных частей элементов МСТ, изготовленных по MUMPs-технологии, была решена с помощью предохранителей (dimple), которые размещаются под первым структурным слоем поликремния.

На рис.1.10 показаны основные этапы изготовления актюаторного элемента МСТ на основе MUMPs-технологии [28].

Процесс начинается с создания диффузионного слоя нитрида кремния (nitride) и осаждения слоя поликремния (poly0) (рис.1.10,а). Далее производится осаждение первого жертвенного слоя (ox1) и формирования в нем предохранителей (dimple) и контактов (якорей) первого структурного слоя (anchor1) к подложке и/или poly0 (рис.1.10,б). После нанесения первого структурного слоя (poly2) производится формирование микромеханических структур элементов МСТ и нанесение второго жертвенного слоя (ox2). С помощью травления во втором жертвенном слое формируются контакт второго структурного слоя (anchor2) к подложке и/или poly0 и контакты второго структурного слоя к первому (P1_P2_Via) (рис.1.10,в.). Далее производится осаждение второго структурного слоя и формирования в нем различных частей элементов МСТ (рис.1.10,г). На последнем этапе процесса производится металлизация и освобождение структуры элементов МСТ с помощью удаления первого и второго

жертвенных слоев (рис.1.10,д).

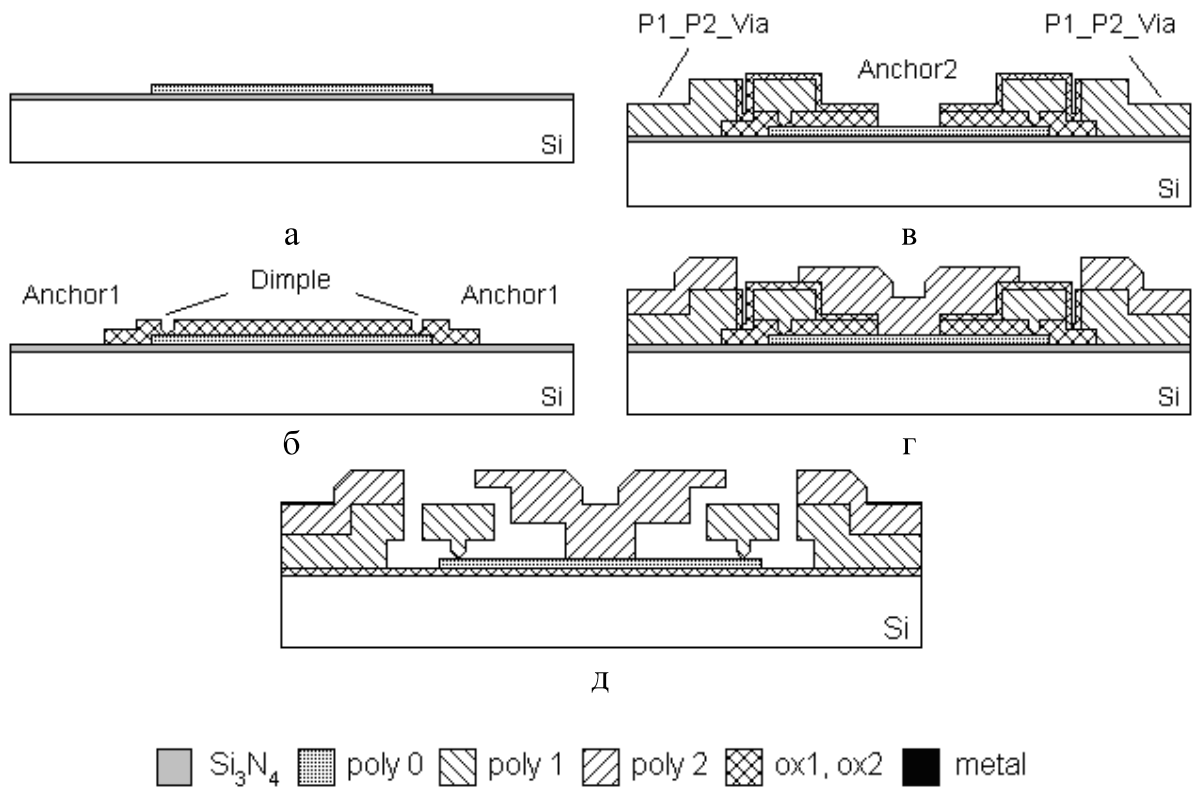


Рис.1.10. Основные этапы изготовления элементов МСТ с использованием MUMPs-технологии:

- а – создание слоя изоляции и осаждение poly0;
- б – осаждение ox1, формирование предохранителей и контактов;
- в – осаждение poly1 и ox2, формирование структуры элемента;
- г – осаждение poly2 и формирование структуры элемента МСТ;
- д – осаждение metal и удаление ox1 и ox2

По данной технологии изготавливается большинство планарных элементов МСТ. Использование поликремния в качестве структурного материала сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники в MUMPs-технологии обосновывается тем, что данный материал обладает хорошими механическими свойствами. Отлаженная технология и методы фотолитографии позволяют создавать сенсорные и актюаторные элементы МСТ в одном технологическом процессе с микроэлектронными устройствами ИС.

Недостатком данной технологии является невозможность изготовления элементов МСТ из другого материала, кроме как из поликремния.

Достоинством MUMPs-технологии (как и поверхностной микрообработки) является возможность создания большого количества различных по функциональному назначению элементов МСТ в одном процессе изготовления с незначительными изменениями, а также возможность интегрального создания

сенсорных и актюаторных элементов на одной подложке с элементами обработки, передачи и хранения информации. Кроме того, планарные многоуровневые актюаторные элементы имеют большую функциональность по сравнению с конструкциями тех же размеров, созданных с использованием объемной микрообработки.

В табл.1.4 приведены физико-топологические параметры слоев, используемых в MUMPs-технологии [28].

Таблица 1.4

Физико-топологические параметры слоев,
используемых в MUMPs-технологии

Слой	Толщина, мкм	Остаточное напряжение, МПа			Удельное сопротивление, Ом/кв		
		min	типичное	max	min	типичное	max
nitride	0,6	0	90	180	-		
poly0	0,5	0	-25	-150	15	30	45
ox1	2,0	-			-		
poly1	2,0	0	-10	-20	1	10	20
ox2	0,75	-			-		
poly2	1,5	0	-10	-20	10	20	30
metal	0,5	0	50	100	0,05	0,06	0,07

В настоящее время ведется разработка пятислойного процесса MUMPs-технологии. Отличием пятислойного процесса MUMPs-технологии от трехслойного является использование четырех структурных слоев и наличие операции механической полировки. Операция микромеханической полировки призвана снизить текстурирование поверхностей верхних структурных слоев поликремния.

1.5. SUMMiT-технология

SUMMiT-технология (Sandia Ultra-planar, Multi-level MEMS Technology) представляет собой четырехслойный поликремниевый процесс стандартной технологии поверхностной микрообработки, разработанный в Sandia National Laboratories (USA) [30].

Как отмечалось выше, использование большого числа структурных слоев приводит к появлению текстурирования поверхностей верхних слоев. Чтобы снизить погрешность изготовления интегральных элементов МСТ, связанную с текстурированием, компания Sandia разработала метод планаризации, основанный на химико-механической полировке. Данная операция осуществляется над верхними слоями поликремния и позволяет сохранить планарность процесса изготовления элементов МСТ [30].

В табл.1.5 приведены топологические параметры слоев в порядке нанесения на подложку, используемых в SUMMiT-технологии [30].

Таблица 1.5

Топологические параметры слоев, используемых в SUMMiT-технологии

Слой	Толщина, мкм
Оксид кремния (SiO_2)	0,63
Нитрид кремния (Si_3N_4)	0,8
Слой поликремния (poly0)	0,3
Первый жертвенный слой (ox1)	2,0
Первый структурный слой (poly1)	1,0
Второй жертвенный слой (ox2)	0,5
Второй структурный слой (poly2)	1,5
Третий жертвенный слой (ox3)	2,0
Третий структурный слой (poly3)	2,25

Остаточное напряжение структурных слоев используемых в SUMMiT-технологии, составляет менее 5 МПа [30].

В настоящее время разработана SUMMiT V-технология, представляющая собой пятислойный поликремниевый процесс. Отличие данной технологии от SUMMiT-технологии заключается в дополнительных жертвенном (ox4) и структурном (poly4) слоях, толщиной 2,0 и 2,25 мкм соответственно. Что позволяет создавать элементы МСТ на перемещаемых платформах. Кроме того, могут быть изготовлены более «высокие» элементы МСТ (порядка 12 мкм толщиной) [30].

Недостатком данной технологии является невозможность изготовления элементов МСТ из другого материала, кроме как из поликремния.

Достоинством SUMMiT-технологии (как и MUMPs-технологии) является возможность интегрального создания большого количества различных по функциональному назначению элементов МСТ в одном процессе изготовления с элементами ИС, что позволяет снизить стоимость устройств.

2. СЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Сенсор – это устройство, преобразующее входное воздействие различной физической природы в электрический сигнал.

Сенсорные элементы микросистемной техники составляют один из классов твердотельных датчиков, чья основная особенность – конструктивно-технологическая и функциональная интеграция на одном кристалле совместно с устройствами интегральных схем [2,7,9,31-35].

Сенсорные элементы МСТ не работают самостоятельно. Обычно, они являются частью большой микросистемы, состоящей из набора различных, по функциональному признаку, сенсоров и аналого-цифровых цепей обработки сигнала.

В качестве сенсорных элементов МСТ используются как элементы ИС (резисторы, конденсаторы, диоды и транзисторы), изготовленные по традиционным технологиям ИС, так и микромеханические структуры (мембраны, бал-

2. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МСТ В СИЛОВОМ ПОЛЕ

2.1. Закон Гука

В 1676 году английский ученый Роберт Гук открыл фундаментальную закономерность между силами и вызванными ими перемещениями: сила растяжения или сжатия, приложенная к телу в форме стержня, вызывает изменение длины тела (рис. 2.1).

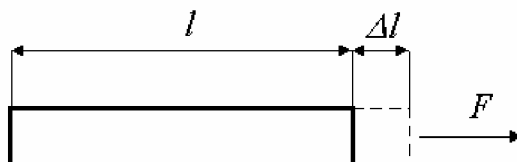


Рис. 2.1. К понятию закона Гука

Величина изменения длины тела зависит от размеров тела, материала и величины силы [3]:

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.1)$$

где F – внешняя сила; S – площадь поперечного сечения тела; E – модуль Юнга (упругости); Δl – изменение длины тела; l – длина тела.

Так как

$$\begin{aligned} \frac{F}{S} &= \sigma; \\ \frac{\Delta l}{l} &= \varepsilon, \end{aligned} \quad (2.2)$$

то выражение (2.1) примет вид

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.3)$$

где σ – механическое напряжение; ε – относительная деформация.

Необходимо отметить, что модуль Юнга является физической постоянной материала и определяется экспериментально.

На основании закона Гука (2.3) можно сказать, что модуль Юнга равен отношению приложенного напряжения к вызванному им относительному удлинению [3]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2.4)$$

Величина, обратная модулю Юнга, называется коэффициентом упругости [3,4]:

$$\alpha = \frac{1}{E} = \frac{\varepsilon}{\sigma}. \quad (2.5)$$

Необходимо помнить, что закон Гука выполняется только в области упругих деформаций.

Абсолютное значение отношения относительной поперечной деформации $\varepsilon_{попер}$ к относительной продольной деформации $\varepsilon_{прод}$ при растяжении или сжатии в области действия закона Гука, называется коэффициентом Пуассона [3]:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_{попер}}{\varepsilon_{прод}} \right|. \quad (2.6)$$

Если на тело вдоль его оси действует некоторая внешняя сила (см. рис.2.1), то согласно закону Гука относительная продольная деформация будет определяться следующим выражением [3]:

$$\varepsilon_{прод} = \frac{\sigma_{прод}}{E}. \quad (2.7)$$

Относительная поперечная деформация определяется выражением [3]:

$$\varepsilon_{попер} = -\frac{\sigma_{попер}}{E}. \quad (2.8)$$

Если на тело действуют внешние силы вдоль трех осей X, Y, Z (рис. 2.2), то относительная деформация тела по этим осям будет уже зависеть от всех действующих на тело сил.

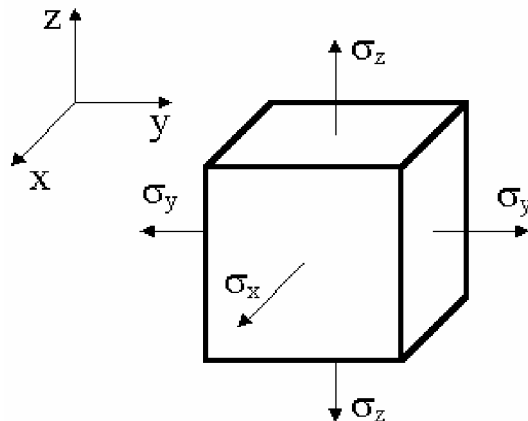


Рис. 2.2. К понятию обобщенного закона Гука

Рассмотрим действие сил вдоль оси X (см. рис. 2.2). От действия напряжения σ_x , направленного вдоль оси X, относительная линейная деформация по данной оси составит

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}. \quad (2.9)$$

От действия напряжения σ_y , направленного вдоль оси Y, относительная линейная деформация по оси X составит

$$\varepsilon_x = -\mu \cdot \frac{\sigma_y}{E}. \quad (2.10)$$

От действия напряжения σ_z , направленного вдоль оси Z , относительная линейная деформация по оси X составит

$$\varepsilon_x = -\mu \cdot \frac{\sigma_z}{E}. \quad (2.11)$$

Сложив выражения (2.9)–(2.11), получим [3]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_x - \mu \cdot (\sigma_y + \sigma_z) \right]. \quad (2.12)$$

Аналогично получаем выражения для относительной линейной деформации по осям Y, Z :

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_y - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_z) \right]; \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \right]. \quad (2.14)$$

Выражения (2.12)–(2.14) представляют собой аналитическое выражение обобщенного закона Гука.

Закон Гука при сдвиге будет иметь следующий вид (рис. 2.3) [3, 4]:

$$\tau = \frac{F}{S} = G \cdot \gamma, \quad (2.15)$$

где τ – касательное напряжение; F – сила, параллельная площади S ; S – площадь поверхности; G – модуль сдвига (упругости); γ – угловая деформация.

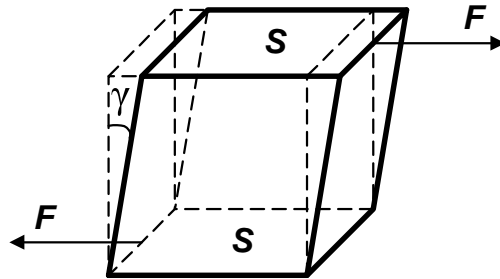


Рис. 2.3. К понятию закона Гука при сдвиге

Необходимо отметить, что модуль сдвига, как и модуль Юнга, является физической постоянной материала и определяется экспериментально.

Модуль сдвига связан с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона следующим выражением [4]:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}. \quad (2.16)$$

Величина, обратная модулю сдвига, называется коэффициентом сдвига [4]:

$$\beta = \frac{1}{G} = \frac{2 \cdot (1 + \mu)}{E}. \quad (2.17)$$

Физические постоянные материалов, используемых в качестве структур-

ных материалов микромеханических элементов МСТ, приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1

Физические постоянные материалов

п/п материал	Модуль Юнга (E), ГПа	Модуль сдвига (G), ГПа	Коэффициент Пуассона (μ)	Плотность (ρ), кг/м ³
Кремний (Si)				
<001>	130	50	0,28	2320
<011>	150	70	0,06	
<010>	130	50	0,28	
Поликремний (poly Si)	169	69	0,22	2100
Карбид кремния (SiC)				
<001>	270	103	0,31	3200
<011>	350	162	0,08	
<010>	270	103	0,31	

2.2. Момент инерции сечения

Осевым моментом инерции сечения относительно данной оси называется сумма произведений элементарных площадей dA на квадрат их расстояний до данной оси (например, x или y), которая распространяется на всю площадь сечения A . Так, осевые моменты инерции (рис. 2.4) относительно осей x и y равны [3]:

$$J_x = \int_A y^2 \cdot dA; \quad (2.18)$$

$$J_y = \int_A x^2 \cdot dA. \quad (2.19)$$

Полярным моментом инерции сечения относительно данной точки (полюс O) называется сумма произведений элементарных площадей dA на квадраты их расстояний до этой точки, которая распространяется на всю площадь сечения A . Следовательно,

$$J_\rho = \int_A \rho^2 \cdot dA. \quad (2.20)$$

Осевые и полярный моменты инерции всегда положительны и выражаются в см⁴ или м⁴.

Отметим интересное свойство: полярный момент инерции J_ρ равен сумме осевых моментов инерции J_x и J_y относительно любой пары взаимно перпендикулярных осей x и y , проходящих через полюс O .

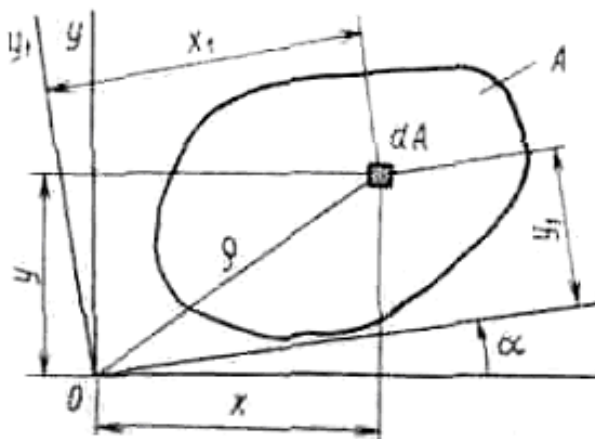


Рис. 2.4. Осевой момент инерции

Действительно, как видно из рис. 2.4, $\rho^2 = x^2 + y^2$, и

$$J_{\rho} = \int_A \rho^2 \cdot dA = \int_A (x^2 + y^2) \cdot dA = \int_A x^2 \cdot dA + \int_A y^2 \cdot dA = J_y + J_x. \quad (2.21)$$

Если оси x и y повернуть относительно полюса O на некоторый угол α (см. рис.2.4), то $\rho^2 = x_1^2 + y_1^2$ и, следовательно, $J_{\rho} = J_{x1} + J_{y1}$, т. е. при любом повороте осей относительно начала координат (полюса O) сумма осевых моментов инерции остается постоянной:

$$J_x + J_y = J_{x1} + J_{y1} = J_{\rho} = \text{const}. \quad (2.22)$$

Центробежным моментом инерции сечения относительно осей координат (например, осей x и y) называется сумма произведений элементарных площадей dA на их расстояния до этих осей, которая распространяется на всю площадь сечения A . Таким образом,

$$J_{xy} = \int_A x \cdot y \cdot dA. \quad (2.23)$$

Центробежный момент инерции J_{xy} выражается в см^4 или м^4 и может быть положительным, отрицательным и равным нулю в зависимости от положения сечения относительно осей координат.

Если сечение занимает положение относительно осей x и y , как показано на рис. 2.5, а, то в этом случае $J_{xy} > 0$, так как координаты x и y положительны. Повернем оси координат на 90° против хода часовой стрелки (рис. 2.5, б). Теперь $J_{xy} < 0$, так как $x > 0$, а $y < 0$. Отсюда следует, что при повороте осей на некоторый угол $\alpha < 90^\circ$ центробежный момент может быть равен нулю: $J_{xy} = 0$.

Для некоторых сечений можно сразу указать оси, относительно которых $J_{xy} = 0$. Рассмотрим сечение, имеющее ось симметрии (рис. 2.6). Центробежные моменты инерции полусечений, расположенные по разные стороны от оси

у, равны между собой, но отличаются знаками. Следовательно, $J_{xy} = 0$.

Момент инерции зависит от вида сечения консольной балки (рис. 2.7) [3]:

- с трапециевидным сечением:

$$J_x = \frac{(w_1 + w_2)}{24} \cdot h^3; \quad (2.24)$$

$$J_y = \frac{(w_1 + w_2) \cdot (w_1^2 + w_2^2)}{48} \cdot h, \quad (2.25)$$

где w_1 – ширина поверхности балки; w_2 – ширина основания балки; h – толщина балки.

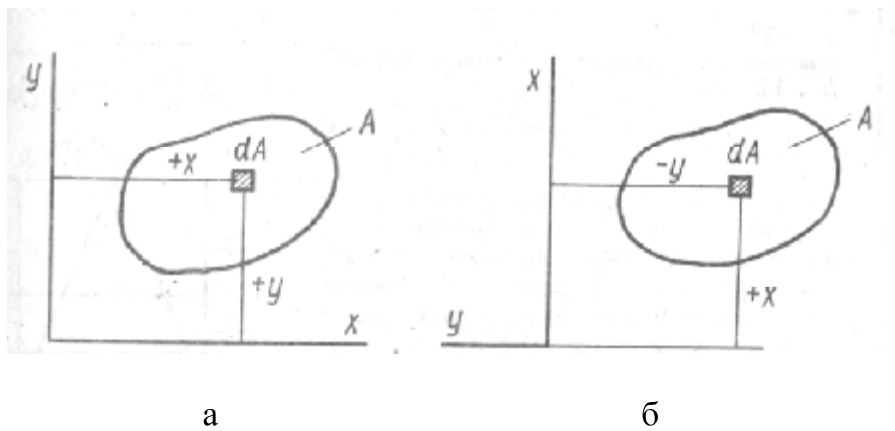


Рис. 2.5. Центробежный момент инерции

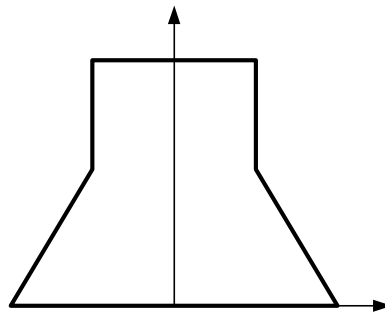


Рис. 2.6. Центробежный момент инерции для симметричных сечений

Ширина поверхности и ширина основания консольной балки с трапециевидным сечением связаны следующим выражением:

$$w_1 = w_2 - 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (2.26)$$

где ϕ – угол травления консольной балки.

- с прямоугольным:

$$J_x = \frac{w \cdot h^3}{12}; \quad (2.27)$$

$$J_y = \frac{h \cdot w^3}{12}, \quad (2.28)$$

где w – ширина балки.

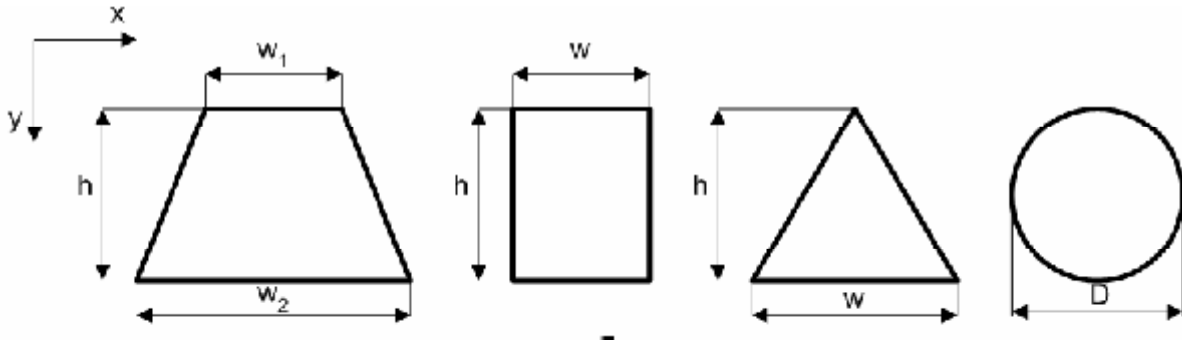


Рис. 2.7. Виды сечения балки

Центробежный момент инерции $J_{xy} = 0$, так как оси x и y являются осями симметрии.

- с треугольным:

$$J_x = \frac{w \cdot h^3}{36}; \quad (2.29)$$

$$J_y = \frac{h \cdot w^3}{48}. \quad (2.30)$$

Центробежный момент инерции $J_{xy} = 0$, так как оси x и y являются осями симметрии.

- с круглым:

$$J_x = J_y \approx 0.05 \cdot D^4; \quad (2.31)$$

$$J_\rho \approx 0.1 \cdot D^4, \quad (2.32)$$

где D – диаметр балки.

2.3. Жесткость микромеханических элементов при изгибе

На рис. 2.8 приведена структура консольной балки.

Под действием внешней силы $F_{внеш}$ консольная балка отклоняется от первоначального положения. По закону Гука, силе $F_{внеш}$, действующей на балку, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению:

$$F_{внеш} = -F_{упр} = ky, \quad (2.33)$$

где k – жесткость консольной балки; y – перемещение, совершаемое балкой под действие силы $F_{внеш}$.



Рис. 2.8. Структура консольной балки

Перемещение y определяется выражением:

$$y = l \cdot \sin \gamma, \quad (2.34)$$

где l – расстояние от якорной области консольной балки до точки приложения внешней силы; γ – угол поворота балки.

При малых углах отклонения (менее 10^0):

$$\sin \alpha = \alpha; \cos \alpha = 1.$$

Таким образом, выражения (2.34) примет следующий вид:

$$y = l \cdot \gamma. \quad (2.35)$$

Определим жесткость консольной балки.

Под действием внешней силы $F_{внеш}$, балка будет изгибаться по окружности с центром в точке 0, радиусом изгиба ρ и углом изгиба γ (рис. 2.9). Угол изгиба γ определяется следующим выражением

$$\gamma = \frac{l}{\rho}, \quad (2.36)$$

где ρ – радиус изгиба, определяемый выражением [5]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot J}, \quad (2.37)$$

где M – изгибающий момент, действующий на балку; E – модуль Юнга, $[H/m^2]$; J – момент инерции сечения консольной балки.

Изгибающий момент, действующий на балку, определяется следующим выражением:

$$M = k \cdot \gamma \cdot l^2. \quad (2.38)$$

Подставив (2.37) и (2.38) в (2.36), получим выражение для определения жесткости консольной балки, приведенной на рис. 2.8:

$$k = \frac{E \cdot J}{l^3}. \quad (2.39)$$

Рассмотрим структуру гребенчатого электростатического актюатора (рис. 2.10.).

Под действием силы $F_{эл}$ ротор отклоняется от первоначального положения. По закону Гука, силе $F_{эл}$, действующей на ротор, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$ упругого подвеса, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению:

$$F_{эл} = -F_{упр} = k_s \cdot y, \quad (2.40)$$

где k_s – жесткость упругого подвеса; y – перемещение, совершаемое упругим подвесом под действие силы $F_{эл}$.

Непосредственно жесткости балок 1-8 (см. рис.2.10) определяются с помощью выражения (2.39).

Как видно на рис. 2.10, упругий подвес образован четырьмя последовательно соединенными парами балок: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, причем консольные балки в парах соединены параллельно.

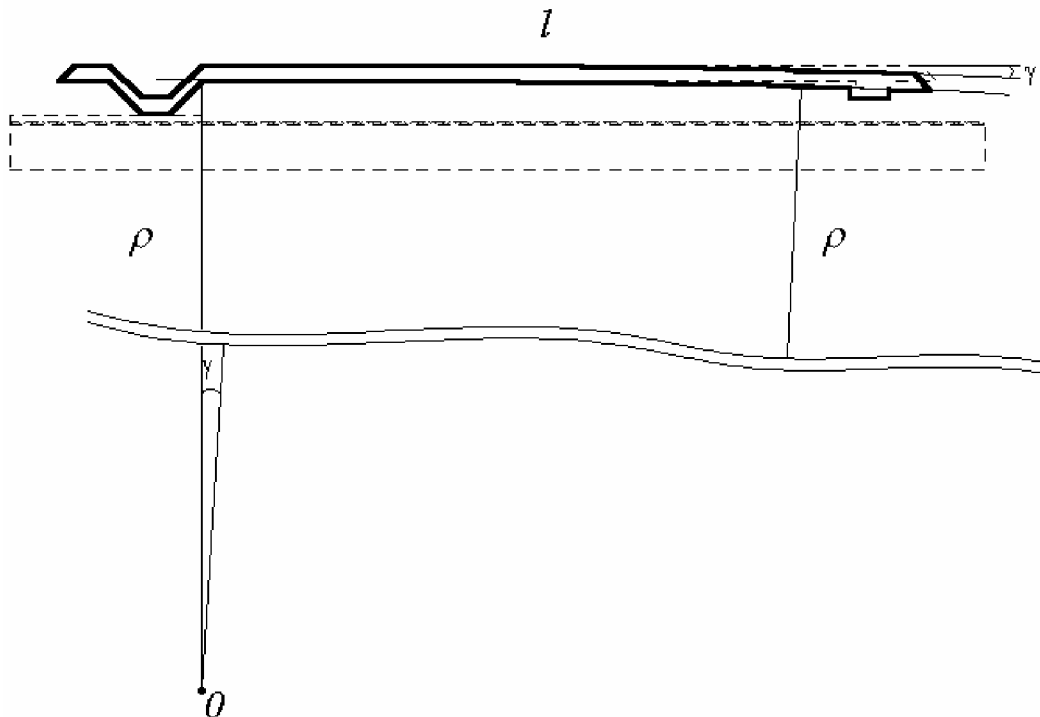


Рис. 2.9. Модель движения консольной балки

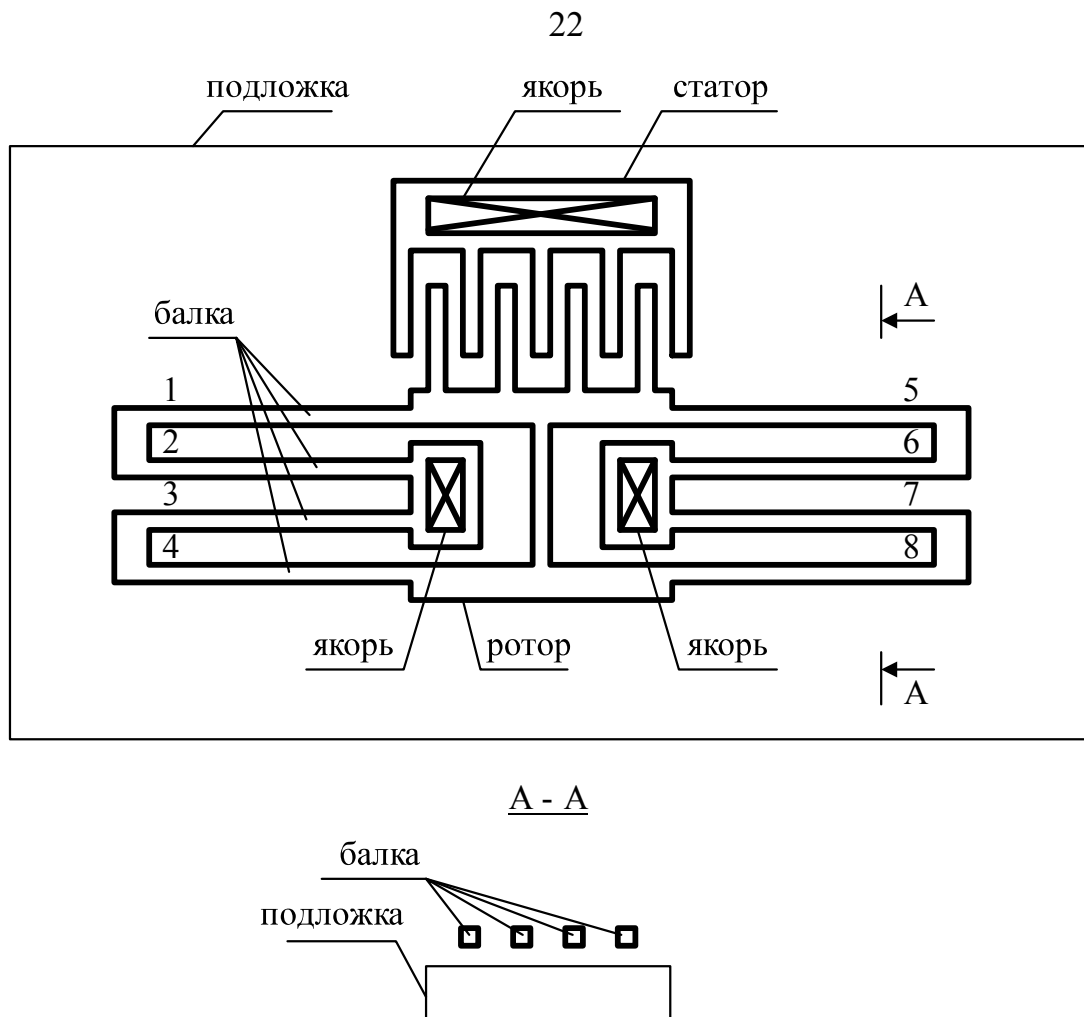


Рис. 2.10. Структура гребенчатого электростатического актюатора

Таким образом, жесткости пар параллельно соединенных консольных балок определяется следующими выражениями [5]:

$$\begin{cases} k_{nap1} = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}; \\ k_{nap2} = \frac{k_3 \cdot k_4}{k_3 + k_4}; \\ k_{nap3} = \frac{k_5 \cdot k_6}{k_5 + k_6}; \\ k_{nap4} = \frac{k_7 \cdot k_8}{k_7 + k_8}. \end{cases} \quad (2.41)$$

где $k_1 \div k_8$ – жесткости балок упругого подвеса.

Жесткости последовательно соединенных пар консольных балок определяется выражениями [5]:

$$\begin{cases} k_{\text{носл1}} = k_{\text{нар1}} + k_{\text{нар2}}; \\ k_{\text{носл2}} = k_{\text{нар3}} + k_{\text{нар4}}. \end{cases} \quad (2.42)$$

Жесткость упругого подвеса гребенчатого электростатического актюатора определяется с помощью следующего выражения:

$$k_s = k_{\text{носл1}} + k_{\text{носл2}}. \quad (2.43)$$

2.4. Жесткость микромеханических элементов при сдвиге (кручении)

Электростатический крутящий момент силы, действующий на торсионную балку, определяется следующим выражением:

$$M_{\text{эл}} = F_{\text{эл}} \cdot l, \quad (2.44)$$

где l – расстояние от торсионной балки до точки приложения внешней силы.

Под действием электростатического крутящего момента силы $M_{\text{эл}}$ зеркальный элемент отклоняется от первоначального положения за счет кручения торсионной балки. Согласно закону Гука:

$$M_{\text{эл}} = k_{\gamma} \cdot \gamma, \quad (2.45)$$

где k_{γ} – угловая жесткость торсионной балки; γ – угол поворота торсионной балки под действием крутящего момента силы $M_{\text{эл}}$.

Угловая жесткость торсионной балки определяется следующим выражением:

$$k_{\gamma} = 2 \cdot \frac{G \cdot J_{\rho}}{l_b}, \quad (2.46)$$

где l_b – длина торсионной балки.

2.5. Демпфирование колебаний микромеханических элементов

Демпфирование колебаний мембраны осуществляется за счет перетекания вязкой среды (газа или жидкости) из подмембранной полости через калибровочные отверстия. На рис. 2.11 показано одно из таких отверстий.

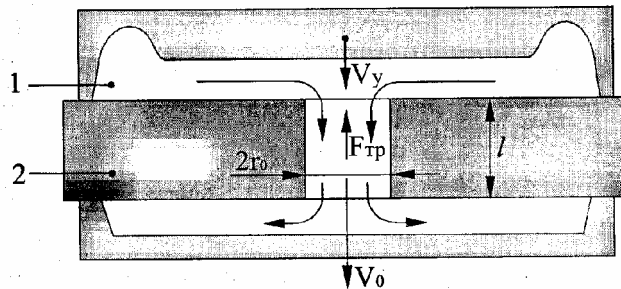


Рис. 2.11. К определению абсолютного коэффициента демпфирования

Имея в виду ламинарный режим течения жидкости, полагаем, что скорость в продольном сечении отверстия изменяется по известному параболическому закону [6]:

$$V = V_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right], \quad (2.47)$$

где V_0 – скорость по оси отверстия; r_0 – радиус калибровочного отверстия.

Демпфирующая сила F_{∂} равна силе трения F_{mp} вязкой среды о стенки отверстия [6]:

$$F_{\partial} = F_{mp} = -k_{\partial} \cdot V_y, \quad (2.48)$$

где V_y – скорость перемещения жесткого центра мембраны; k_{∂} – абсолютный коэффициент демпфирования, определяемый с помощью следующего выражения:

$$k_{\partial} = -\frac{F_{mp}}{V_y}. \quad (2.49)$$

Сила трения вязкой среды определяется следующим выражением:

$$F_{mp} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{\tau_{mp}}, \quad (2.50)$$

где τ_{mp} – касательное напряжение трения вязкой среды на стенках отверстия, определяемое следующим выражением [6]:

$$\tau_{mp} = \mu \cdot \left(\frac{dV}{dr} \right) \Big|_{r=r_0}, \quad (2.51)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости среды.

С учетом выражения (2.47), получим

$$\left(\frac{dV}{dr} \right) \Big|_{r=r_0} = -2 \frac{V_0}{r_0}, \quad (2.52)$$

и, следовательно

$$F_{mp} = -4 \cdot \pi \cdot V_0 \cdot \mu \cdot l, \quad (2.53)$$

где l – толщина мембраны.

Скорость V_0 можно определить из условия равенства объемных расходов вязкой среды:

$$V_0 \cdot S_2 = V_y \cdot S_1, \quad (2.54)$$

где S_2, S_1 – площади поперечных сечений калибровочного отверстия и подмембранной полости, соответственно.

С учетом выражения (2.54) получим выражение для абсолютного коэффициента демпфирования мембраны с калибровочными отверстиями [6]:

$$k_{\partial} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot l \cdot S_1}{n_0 \cdot S_2}, \quad (2.55)$$

Таблица 1.5

Топологические параметры слоев, используемых в SUMMiT-технологии

Слой	Толщина, мкм
Оксид кремния (SiO_2)	0,63
Нитрид кремния (Si_3N_4)	0,8
Слой поликремния (poly0)	0,3
Первый жертвенный слой (ox1)	2,0
Первый структурный слой (poly1)	1,0
Второй жертвенный слой (ox2)	0,5
Второй структурный слой (poly2)	1,5
Третий жертвенный слой (ox3)	2,0
Третий структурный слой (poly3)	2,25

Остаточное напряжение структурных слоев используемых в SUMMiT-технологии, составляет менее 5 МПа [30].

В настоящее время разработана SUMMiT V-технология, представляющая собой пятислойный поликремниевый процесс. Отличие данной технологии от SUMMiT-технологии заключается в дополнительных жертвенном (ox4) и структурном (poly4) слоях, толщиной 2,0 и 2,25 мкм соответственно. Что позволяет создавать элементы МСТ на перемещаемых платформах. Кроме того, могут быть изготовлены более «высокие» элементы МСТ (порядка 12 мкм толщиной) [30].

Недостатком данной технологии является невозможность изготовления элементов МСТ из другого материала, кроме как из поликремния.

Достоинством SUMMiT-технологии (как и MUMPs-технологии) является возможность интегрального создания большого количества различных по функциональному назначению элементов МСТ в одном процессе изготовления с элементами ИС, что позволяет снизить стоимость устройств.

2. СЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Сенсор – это устройство, преобразующее входное воздействие различной физической природы в электрический сигнал.

Сенсорные элементы микросистемной техники составляют один из классов твердотельных датчиков, чья основная особенность – конструктивно-технологическая и функциональная интеграция на одном кристалле совместно с устройствами интегральных схем [2,7,9,31-35].

Сенсорные элементы МСТ не работают самостоятельно. Обычно, они являются частью большой микросистемы, состоящей из набора различных, по функциональному признаку, сенсоров и аналого-цифровых цепей обработки сигнала.

В качестве сенсорных элементов МСТ используются как элементы ИС (резисторы, конденсаторы, диоды и транзисторы), изготовленные по традиционным технологиям ИС, так и микромеханические структуры (мембраны, бал-

ки), изготавливаемые с использованием технологий МСТ.

В настоящее время классификация сенсоров проводится по различным признакам:

1. По технологии изготовления – гибридно-пленочные, твердотельные биполярные или МДП- структуры и т.д.
2. По выходному электрическому сигналу – емкостные, резистивные, индуктивные и т.д.
3. По измеряемому параметру – сенсоры температуры, давления, магнитного поля и т.д.

С точки зрения формирования сигнала, сенсорные элементы делятся на активные и пассивные. Активный сенсор требует наличия внешнего источника возбуждения, в то время как пассивный сенсор генерирует свой выходной сигнал без использования внешнего источника тока или напряжения. Примерами активных сенсоров являются тензодатчики и акселерометры, сенсоры магнитного поля и химического состава газовых средств. К пассивным сенсорам можно отнести термоэлементы и фотодиоды, которые образуют термоэлектрические напряжения или фотодиодный ток, соответственно, без внешних источников энергии.

2.1. Сенсоры температуры на основе термопар

Развитие микросистемной техники привело к созданию одного из многочисленных видов сенсоров температуры, в основу работы которых положены термоэлектрические явления.

Термоэлектрические явления возникают в результате взаимодействия тепловых и электрических процессов.

Эффект Зеебека заключается в появлении термоЭДС в замкнутой цепи, составленной из разнородных полупроводников, контакты между которыми поддерживаются при разных температурах [35].

Рассмотрим полупроводник, вдоль которого существует градиент температуры (рис.2.1). Подвижные носители в области с высокой температурой имеют большие кинетические энергии и скорости, чем в области с более низкой температурой. Вследствие этого носители начинают диффундировать из более горячей области в более холодную область. Несмотря на то, что одновременно происходит также и движение носителей из холодной области в горячую, поток носителей из горячей области в холодную преобладает. Поэтому на холодном конце полупроводника происходит накопление объемного заряда одного знака, а на горячем – другого [35].

Появление объемных зарядов приводит к образованию в полупроводнике электрического поля.

Если полупроводник n-типа, то направление напряженности образовавшегося электрического поля будет совпадать с направлением теплового потока носителей (рис.2.1,а). Так как технически движение электронов происходит от минуса к плюсу, то из холодной области начинается отток электронов в более горячую область. Если полупроводник p-типа (рис.2.1,б), то направление

напряженности образовавшегося электрического поля будет противоположно направлению теплового потока носителей. Так как технически движение дырок происходит от плюса к минусу, то из холодной области начинается отток носителей в более горячую часть полупроводника [35].

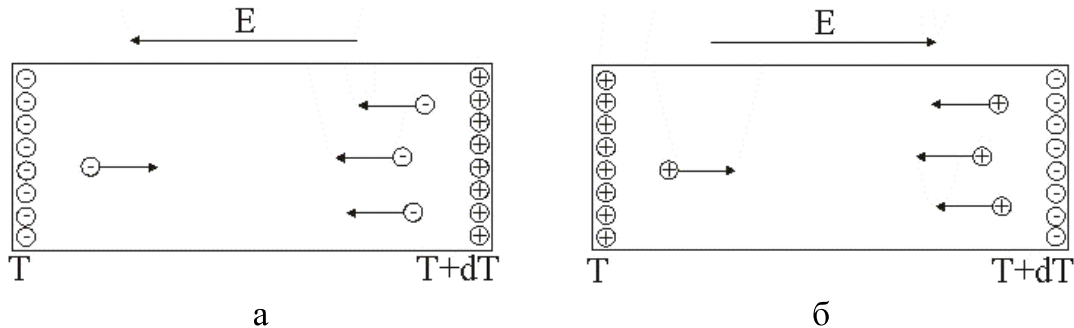


Рис.2.1. К пояснению термоэлектрических эффектов:

а – полупроводник n-типа;

б – полупроводник p-типа

Через некоторое время возникший электрический поток компенсирует тепловой поток носителей и устанавливается динамическое равновесие.

В установившемся динамическом равновесии возникшая за счет объемных зарядов разность потенциалов будет представлять собой термоЭДС. В полупроводнике n-типа горячая область оказывается заряженной положительно, а холодная – отрицательно. В полупроводнике p-типа горячая область заряжается отрицательно, а холодная – положительно [35].

Возникшая величина термоЭДС будет определяться следующим выражением [35]:

$$dU \propto dT, \quad (2.1)$$

где α – дифференциальный коэффициент термоЭДС; T – абсолютная температура.

Знак коэффициента термоЭДС зависит от типа проводимости полупроводника: для n-типа α имеет отрицательный знак, а для p-типа – положительный [35].

Значение коэффициента α для различных полупроводников сильно зависит от вида и концентрации примесей в полупроводнике и может достигать 1000 мкВ/град [35].

Если соединить в замкнутую цепь два разнородных материала, то в цепи потечет ток и результирующее значение термоЭДС будет равно [35]:

$$dU = dU_1 - dU_2 = \alpha_1 dT_1 - \alpha_2 dT_2, \quad (2.2)$$

где dT – разность температур между материалами.

Как видно из выражения (2.2), для того чтобы получить максимальную величину термоЭДС dU , нужно выбирать материалы, у которых коэффициенты α_1 и α_2 имеют наибольшие значения и противоположные знаки [35].

С помощью явления Зеебека, помимо температуры, можно определять и другие физические величины, измерение которых может быть сведено к измерению температур: силы переменного тока, потока лучистой энергии, давления газа и т.д.

Для увеличения чувствительности термоэлементы соединяют последовательно в термобатареи. При этом, все четные спаи поддерживаются при одной температуре, а все нечетные – при другой. ЭДС такой батареи равна сумме термоЭДС отдельных элементов.

Миниатюрные термобатареи (так называемые термостолбики) с успехом применяют для измерения интенсивности света (как видимого, так и невидимого). В соединении с чувствительным гальванометром они обладают огромной чувствительностью и способны обнаруживать тепловое излучение человеческой руки.

Термобатареи используются и как генераторы электрического тока. Однако для преобразования тепловой энергии в электрическую необходимо использовать только полупроводниковые материалы.

Эффект Пельтье заключается в том, что при протекании электрического тока через контакты а и б полупроводников 1 и 2 в области контакта выделяется или поглощается тепло (рис.2.2) [35].

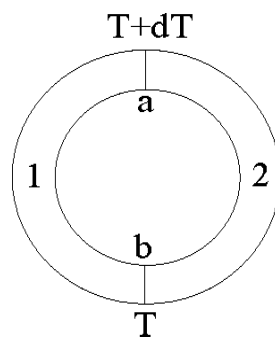


Рис.2.2. Эффект Пельтье

Как отмечалось выше, кинетическая энергия носителей в полупроводнике определяется температурой. Поэтому если направление протекающего в цепи тока таково, что носители переходят из области, где их кинетическая энергия больше в область, где эта энергия меньше, то вблизи контакта они передают свою избыточную энергию кристаллической решетке полупроводника. В этом случае температура второй области повышается. При другом направлении тока носители пополняют свою кинетическую энергию за счет энергии кристаллической решетки, что приводит к понижению температуры полупроводника [35].

Количество тепла, выделяемого или поглощаемого вблизи контакта в единицу времени, можно выразить в следующем виде [35]:

$$Q_{\pi} = I \Pi, \quad (2.3)$$

где I – сила тока, Π – интегральный коэффициент Пельтье, определяемый свойствами контактирующей пары материалов.

Основные направления практического использования эффекта Пельтье в полупроводниках: получение холода для создания термоэлектрических охлаждающих устройств, подогрев для целей отопления, термостатирование, управление процессом кристаллизации в условиях постоянной температуры.

Термоэлектрический метод охлаждения обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами охлаждения. Термоэлектрические устройства отличаются простотой управления, возможностью тонкого регулирования температуры, бесшумностью, высокой надежностью работы. Основным недостатком термоэлектрических устройств – малая величина эффективности, что не позволяет их использовать для промышленного получения «холода».

Термоэлектрические охлаждающие устройства применяются в бытовых и транспортных холодильниках, термостатах, для охлаждения и термостатирования термочувствительных элементов радиоэлектронной и оптической аппаратуры, для управления процессом кристаллизации, в медико-биологических приборах и т.д.

Эффект Томсона заключается в следующем. Если вдоль полупроводника, по которому протекает электрический ток, существует градиент температуры, то кроме джоулева тепла выделяется или поглощается тепло Q_T , пропорциональное силе тока и градиенту температуры. Когда направление тока совпадает с направлением градиента температуры, то при дрейфе носителей от более горячего конца к более холодному их избыточная энергия передается кристаллической решетке полупроводника. Это приводит к повышению температуры более холодной части полупроводника. При другом направлении протекания тока носители пополняют недостаток своей кинетической энергии за счет энергии кристаллической решетки в более горячей области полупроводника. Это приводит к поглощению тепла и понижению температуры горячей области [35].

Количество выделяемого (поглощаемого) тепла определяется следующим выражением [35]:

$$Q_T = \tau I \frac{T_2 - T_1}{T}, \quad (2.4)$$

где τ – коэффициент Томсона.

В замкнутой цепи, состоящей из разнородных материалов, при наличии градиента температуры одновременно возникают все три термоэлектрических эффекта. Связь коэффициентов Зеебека, Пельтье и Томсона выражается следующей зависимостью [35]:

$$\alpha = \frac{\tau}{T}; \quad (2.5)$$

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{T^2}, \quad (2.6)$$

где τ_1, τ_2 – коэффициенты Томсона для двух материалов замкнутой цепи.

Эффект Томсона не имеет технических применений, но должен учитываться в относительно точных расчетах термоэлектрических устройств.

2.2. Сенсоры угловых скоростей

Механические величины можно разделить на три группы [12,31-39].

К первой группе относятся линейные и угловые размеры. Это геометрические параметры различных объектов, характеристики профилей и шероховатости поверхностей, расстояние, параметры износа трущихся частей и т.д.

Ко второй группе относятся различные силовые воздействия. Это механические напряжения в деталях и конструкциях, приложенная сила, крутящие моменты, давления жидкостей и газов, разности давлений и т.д.

Третью группу механических величин составляют параметры движения. Это перемещение объектов в пространстве, линейные и угловые скорости перемещения, ускорения.

Для создания сенсоров механических величин используют мембранные или балочные упругие элементы с различными топологическими параметрами [12,31-39].

Принцип действия сенсоров угловых скоростей (гироскопов) основан на оптических и пьезоэлектрических эффектах, эффекте изменения электрической емкости (упругие элементы являются обкладками конденсатора в емкостных сенсорах механических величин), эффекте изменения частоты колебаний (микромеханический резонатор) [12,31-39].

Для изготовления сенсоров механических величин могут применяться как технологии объемной и поверхностной микрообработки, так и LIGA-технология.

В настоящее время наибольшее распространение получили волоконные оптические и микромеханические гироскопы.

2.2.1. Волоконный оптический гироскоп

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) – это оптико-электронный прибор, создание которого стало возможным лишь с развитием и совершенствованием элементной базы квантовой электроники. Прибор предназначен для измерения угловой скорости и углов поворота подвижного объекта. Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка [39].

Возможность создания реального высокочувствительного ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой одномодового диэлектрического световода с малым затуханием.

Сущность эффекта Саньяка заключается в следующем. Если в замкнутом оптическом контуре в противоположных направлениях распространяются два световых луча, то при неподвижном контуре фазовые набегі обоіх лучей, прошедших весь контур, будут одинаковыми. При вращении контура вокруг оси, нормальной к плоскости контура, фазовые набегі лучей неодинаковы, а разность фаз лучей пропорциональна угловой скорости вращения контура [39].

Рассмотрим принцип работы волоконного оптического гироскопа на примере идеального кольцевого оптического контура (рис.2.3).

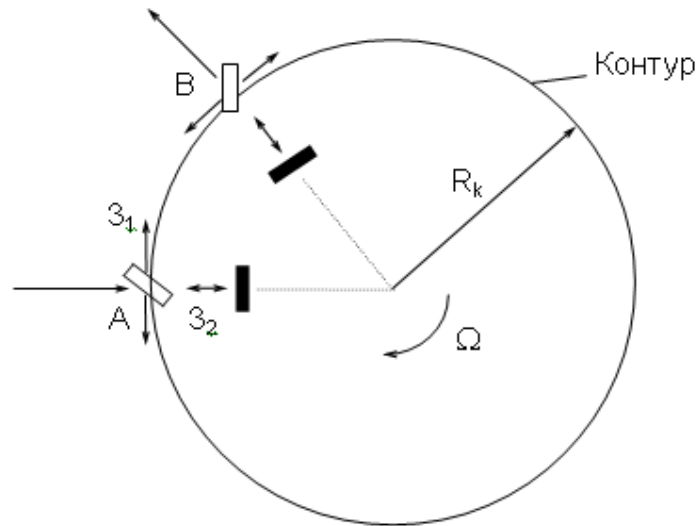


Рис.2.3. Эффект Саньяка в кольцевом оптическом контуре

Луч света приходит в точку А и с помощью зеркал Z_1 и Z_2 расщепляется на два луча, один из которых распространяется по часовой стрелке в контуре, а другой – против часовой стрелки. С помощью этих же зеркал после распространения в контуре лучи объединяются и направляются по одному пути [39]. При неподвижном контуре пути прохождения лучей одинаковы и равны

$$2 \pi R_k = c \tau, \quad (2.7)$$

где R_k – радиус контура; c – скорость света; τ – время прохождения периметра контура лучом.

Оба луча приходят в точку А на расщепитель в фазе. Если контур вращается с постоянной угловой скоростью Ω , то луч, распространяющийся по часовой стрелке, прежде чем попадет на перемещающийся расщепитель, пройдет путь равный

$$2 \pi R_k - R_k \Omega \tau = c \tau. \quad (2.8)$$

Это вызвано тем, что за время прохождения луча по замкнутому контуру расщепитель, находившийся ранее в точке А, уйдет в точку В. Для луча, распространяющегося против часовой стрелки, путь составит

$$2 \pi R_k + R_k \Omega \tau = c \tau. \quad (2.9)$$

Как видно из выражения (2.9), пути распространения противоположно бегущих лучей разные. Поскольку скорость света величина постоянная, это эквивалентно разным временам прохождения лучей, распространяющихся в противоположных направлениях замкнутого вращающегося контура, τ и τ .

Разность времен распространения определяется выражением [39]:

$$\tau - \tau = \frac{2 \pi R_k^2 \Omega}{c^2 R_k^2 - 2}. \quad (2.10)$$

В приближении первого порядка можно выражение (2.10) записать в виде

[39]:

$$\tau = \frac{2 \pi R_k^2}{c^2} \quad (2.11)$$

Как видно из выражения (2.11), разность времени прохождения противоположно бегущими лучами одного и того же расстояния будет прямо пропорционально угловой скорости объекта.

2.2.2. Микромеханические гироскопы

Все микромеханические гироскопы по своему принципу функционирования являются вибрационными [12].

Вибрационный гироскоп был впервые представлен в начале 50-х годов прошлого века для замены вращающихся гироскопов в космической технике. Вибрационные микромеханические гироскопы отличаются от других сложностью их функционирования. Информационный сигнал не формируется на выходе устройства без механического возбуждения инерционных масс. Для получения информационного сигнала, необходимо привести инерционные массы в колебательное линейное или угловое движение. Сигнал очень мал, поэтому требуется механическое усиление его в форме совмещения частот возбуждения колебаний и резонансной частоты колебаний инерционных масс гироскопа.

Различают два типа микромеханических гироскопов: камертонные и кардановые [12].

Принцип работы микромеханических гироскопов камертонного типа заключается в следующем (рис.2.4) [12].

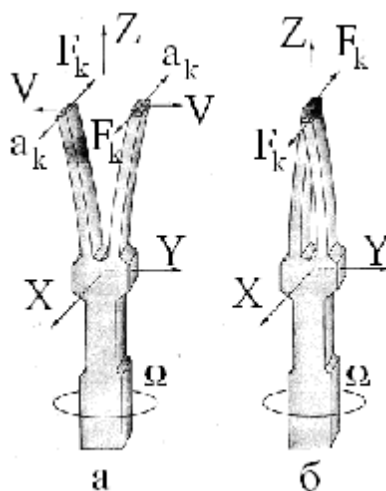


Рис.2.4. Принцип работы камертонных гироскопов

Инерционные массы гироскопа приводятся в противофазное колебательное движение в плоскости YZ. При этом они начинают перемещаться с некоторой скоростью V. При возникновении вращения основания гироскопа с некото-

рой угловой скоростью Ω вокруг оси Z возникает ускорение Кориолиса a_k , определяемое выражением (см. рис.2.4,а) [12,40]:

$$a_k = 2V\Omega. \quad (2.12)$$

Направление вектора ускорения Кориолиса определяется правилом Н.Е.Жуковского: для определения направления вектора ускорения Кориолиса a_k необходимо вектор относительной скорости точки V повернуть в плоскости, перпендикулярной вектору угловой скорости на 90° по направлению вращения устройства [40].

Сила инерции F_k , определяемая выражением (см. рис.2.4,б) [12,40]:

$$F_k = 2m a_k = 2mV\Omega, \quad (2.13)$$

где m – масса, называемая силой Кориолиса, будет направлена в противоположном направлении ускорению a_k . Таким образом, инерционные массы под действием силы F_k начинают совершать противофазные колебания в плоскости XZ . Амплитуда этих колебаний будет пропорциональна величине угловой скорости, а их фаза – направлению.

На рис.2.5 представлен микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности компании Draper Laboratory (США) [12,41].

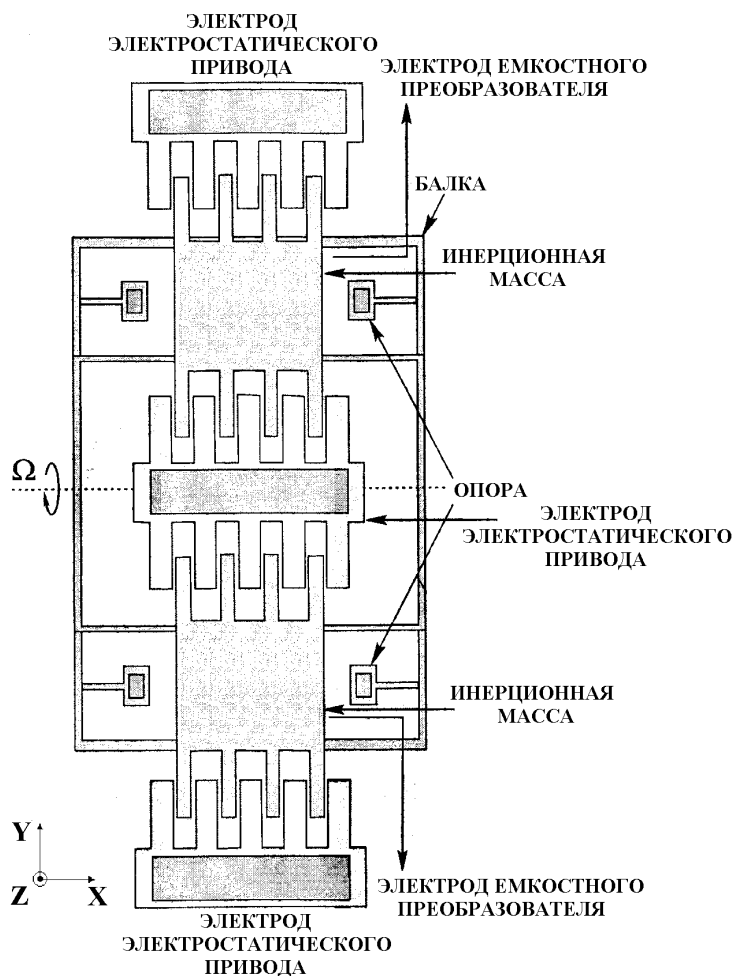


Рис.2.5. Микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности

Данный гироскоп относится к типу камертонных и позволяет измерять величину угловой скорости при вращении его основания вокруг оси X , расположенной в плоскости подложки (см. рис.2.5). Регистрация амплитуды колебаний инерционных масс под действием сил Кориолиса производится с помощью емкостных преобразователей перемещений, образуемых инерционными массами и неподвижными электродами, расположенными под ними [12,41].

Инерционные массы посредством трех электростатических приводов приводятся в колебательное движение в плоскости подложки. Векторы скоростей инерционных масс находятся в противофазе друг другу. При возникновении угловой скорости вокруг оси X под действием сил Кориолиса одна инерционная масса будет подниматься над плоскостью подложки, а другая опускаться. Таким образом, инерционные массы начинают совершать противофазные колебания перпендикулярно плоскости подложки. Емкостные преобразователи перемещений формируют выходной сигнал гироскопа, пропорциональный величине угловой скорости [12,41].

На рис.2.6 представлена структура одноосного микромеханического гироскопа [41].

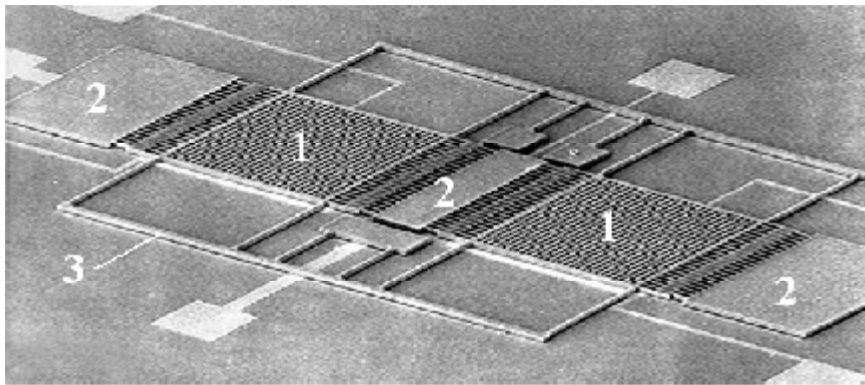


Рис.2.6. Структура одноосного микромеханического гироскопа:
1 – инерционная масса; 2 – неподвижные электроды электростатических приводов; 3 – упругий подвес

На рис.2.7 представлен интегральный микромеханический гироскоп с двумя осями чувствительности [3,12].

Данный гироскоп относится к типу камертонных гироскопов и позволяет измерять величины угловых скоростей при вращении его вокруг двух взаимно перпендикулярных осей X и Y , расположенных в плоскости подложки.

Принцип работы данного микромеханического устройства аналогичен предыдущему. Отличие только в том, что инерционная масса одна, и она совершает возвратно-поступательное движение вокруг своей опоры в плоскости подложки. При возникновении угловой скорости вокруг оси X инерционная масса начинает совершать колебания вокруг оси Y . При возникновении угловой скорости вокруг оси Y – инерционная масса колеблется вокруг оси X .

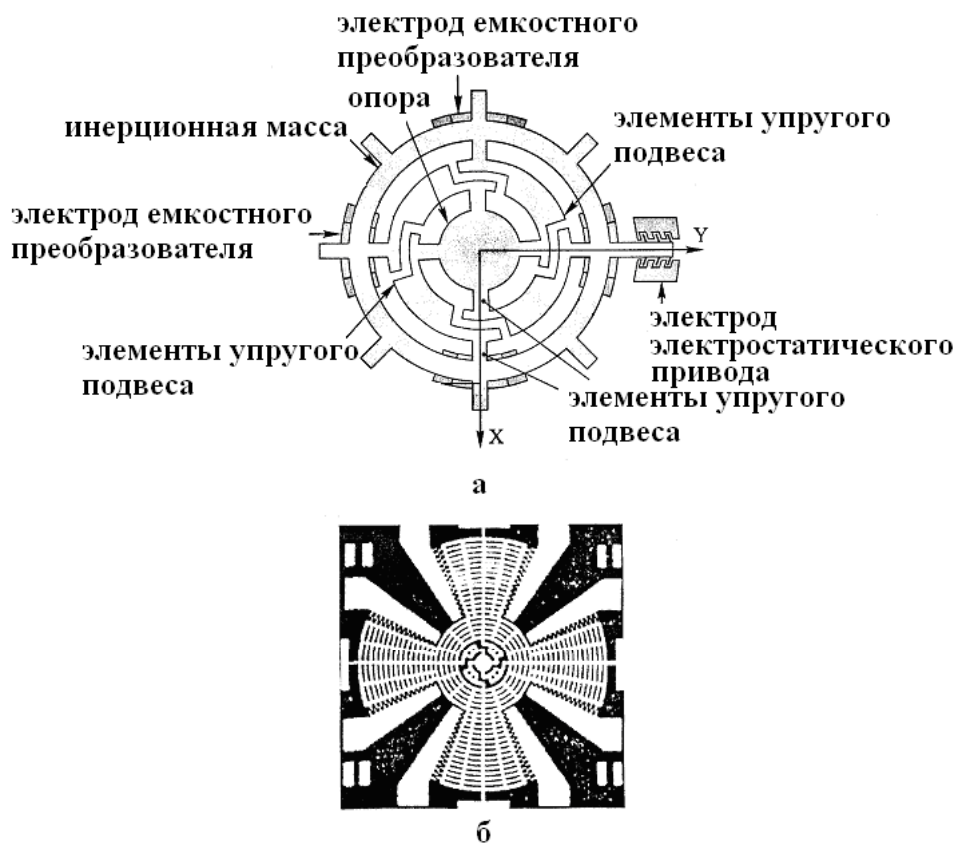


Рис.2.7. Микромеханический гироскоп с двумя осями чувствительности:
а – структура; б – топология

Выходной сигнал гироскопа формируют емкостные преобразователи перемещений, образованные инерционной массой и электродами емкостных преобразователей, расположенные под ней.

На рис.2.8. представлен двuosный микромеханический гироскоп, изготовленный по технологии поверхностной микрообработки[42].

На рис.2.9 приведен микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности карданного типа [12,43].

Инерционная масса приводится в колебательное движение вокруг оси X с помощью электростатических приводов, образованных наружной рамкой и электродами электростатических приводов. При возникновении угловой скорости вокруг оси Z внутренняя рамка под действием гироскопического момента начинает совершать угловые колебания вокруг оси Y за счет кручения упругих торсионов. Амплитуда колебаний внутренней рамки будет пропорциональна величине угловой скорости, а фаза – направлению. Выходной сигнал формируется емкостными преобразователями перемещений, образованных внутренней рамкой и электродом емкостных преобразователей [12,43].

Для регистрации угловых скоростей по трем осям чувствительности используют комбинации одно- и двuosных микромеханических гироскопов (рис.2.10) [42].

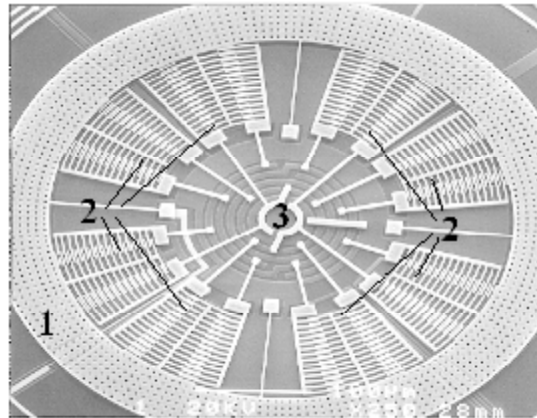


Рис.2.8. Двухосевой микромеханический гироскоп:
1 – инерционная масса; 2 – неподвижные электроды
электростатических приводов; 3 – опора

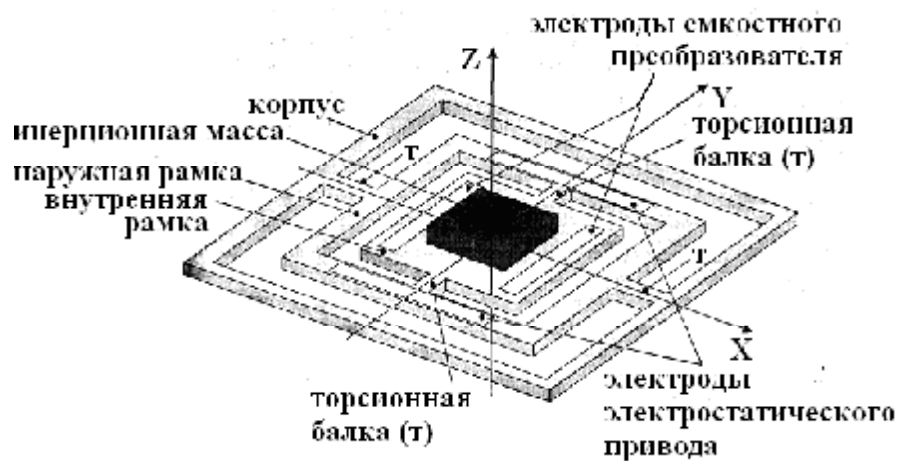


Рис.2.9. Микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности

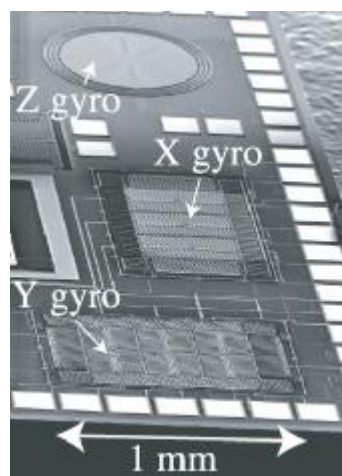


Рис.2.10. Интегральная сенсорная микросистема для регистрации
угловых скоростей по трем осям чувствительности

2.3. Сенсоры магнитного поля

Сенсор магнитного поля представляет собой входной элемент измерительной схемы, преобразующий магнитное поле в электрический сигнал.

Для изготовления интегральных полупроводниковых сенсоров магнитного поля используются методы, применяемые в технологии интегральных схем. Сейчас разрабатываются все новые типы интегральных сенсоров, предназначенных для различных областей применения, что объясняется теми преимуществами, которые дает интеграция на одном кристалле сенсорного элемента и схем обработки сигнала. Конечная цель состоит в создании разнообразных недорогих, изготавливаемых по групповой технологии высококачественных сенсоров, сопряженных с цифровыми системами обработки сигналов, которые находят все более широкое применение [44-47].

Существуют две группы применения сенсоров магнитного поля: непосредственные и косвенные применения [44-47].

2.3.1. Элемент Холла

К первой группе относятся измерение индукции магнитного поля, считывание с магнитных лент или дисков, распознавание рисунка магнитными чернилами на банкнотах и кредитных карточках и т.д.

На рис.2.11 приведена конструкция пленочного элемента Холла, предназначенного для измерения индукции магнитного поля [45,47].

В основе функционирования большинства типов магнитных сенсоров лежат те или иные эффекты, обусловленные действием силы Лоренца на носители заряда полупроводника, движущиеся в электрическом поле.

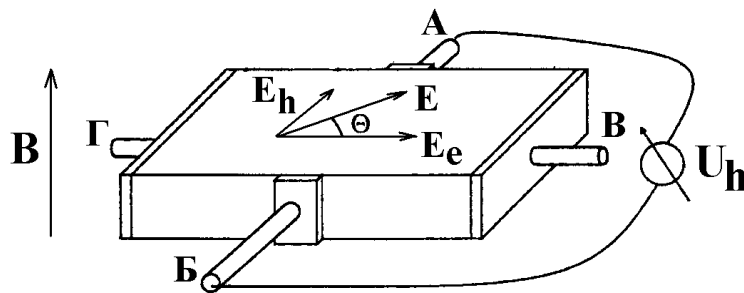


Рис.2.11. Элемент Холла

Сила Лоренца определяется выражением [44-47]:

$$\vec{F} = q \vec{V} \times \vec{B}, \quad (2.14)$$

где q – заряд электрона; \vec{V} – дрейфовая скорость носителей зарядов; \vec{B} – индукция перпендикулярного магнитного поля.

В выражении (2.14) знак «+» ставится, если носителями заряда являются дырки, а знак «-» – электроны.

Дрейфовая скорость носителей заряда определяется выражением [45,47]:

$$\vec{F} = q \mu_n \vec{E}_e \times \vec{B}, \quad (2.15)$$

где μ_n – подвижность носителей заряда; \vec{E}_e – напряженность электрического поля.

Подставив выражение (2.15) в (2.14), получим [45,47]:

$$\vec{F} = q \mu_n \vec{E}_e \times \vec{B}, \quad (2.16)$$

т.е. направление силы Лоренца не зависит от знака носителей, следовательно, электроны и дырки будут отклоняться в одну сторону.

Если элемент Холла n-типа проводимости поместить в перпендикулярное магнитное поле, то основные (электроны) и неосновные (дырки) носители заряда отклоняются к электроду А и накапливаются около него. Но поскольку основных носителей намного больше чем неосновных, то у электрода А будет избыток электронов, а у электрода Б их недостаток. Между электродами А и Б возникает дополнительное электрическое поле, направленное от Б к А. Возникшее электрическое поле называют полем Холла. Его направление перпендикулярно вектору магнитного поля и электрическому току, текущему между электродами В и Г (см. рис.2.11) [45,47].

Поле Холла будет расти до тех пор, пока не скомпенсирует силу Лоренца:

$$q \vec{E}_h = q \vec{v} \times \vec{B}, \quad (2.17)$$

где \vec{E}_h – поле Холла.

После достижения этого условия носители заряда текут по полупроводнику только под действием электрического поля, т.е. магнитное поле как бы отсутствует. Однако суммарная напряженность поля в образце будет равной:

$$\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_h, \quad (2.18)$$

а ее вектор окажется повернутым на некоторый угол Θ , называемый углом Холла. Между электродами А и Б возникает разность потенциалов, называемая ЭДС Холла или холловским напряжением, определяемая выражением [45,47]:

$$U_h = E_h w = R_h j w B, \quad (2.19)$$

где R_h – постоянная Холла; j – плотность тока; w – ширина сенсора; B – индукция магнитного поля.

Плотность тока определяется выражением:

$$j = \sigma \vec{E}_e, \quad (2.20)$$

где σ – удельная проводимость полупроводника [45]:

$$\sigma = q n \mu_n, \quad (2.21)$$

где n – концентрация электронов.

Постоянная Холла определяется выражением [45]:

$$R_h = \frac{1}{q n}. \quad (2.22)$$

Угол Холла определяется с помощью следующего выражения [45,47]:

$$\operatorname{tg} \frac{E_h}{E_e} = \frac{U_h}{U_e} \frac{l}{w} \mu_n^* B, \quad (2.23)$$

где U_e – напряжение электрического поля; l – длина сенсора; μ_n^* – подвижность Холла [45]:

$$\mu_n^* = \sigma R_n. \quad (2.24)$$

2.3.2. Двухколлекторный магнитотранзистор

Ко второй группе применений сенсоров магнитного поля относится обнаружение немагнитных сигналов: обнаружение электрического тока по его магнитному полю, регистрация механического перемещения, определение направления воздействия магнитного поля. Доминирующую роль в данной группе применений сенсоров магнитного поля будут играть миниатюрные системы ориентации, навигации и управления [44-47].

При использовании в данных системах сенсоры магнитного поля объединяют в магниточувствительные микросистемы, содержащие интегральные двухколлекторные горизонтальные и вертикальные биполярные магнитотранзисторы, многостокковые МОП-транзисторы [44-47].

Биполярные магнитотранзисторы более универсальны и могут применяться для измерения всех компонентов вектора индукции магнитного поля и определения направления его воздействия. Кроме того, сенсоры магнитного поля на основе двухколлекторных биполярных магнитотранзисторов по сравнению с сенсорами магнитного поля на основе МОП-транзисторов обладают более низким температурным коэффициентом магниточувствительности.

Двухколлекторные магнитотранзисторы представляют собой биполярные транзисторы с коллектором, разделенным на два, причем каждый коллектор со своим выводом (рис.2.12). Оба коллектора расположены симметрично по отношению к эмиттеру. Поэтому при отсутствии магнитного поля носители заряда поровну распределяются между коллекторами [45]:

$$I_k = I_{k1} = I_{k2}. \quad (2.25)$$

При воздействии магнитного поля с индукцией \vec{B} носители заряда под действием силы Лоренца отклоняются от первоначального положения на угол Холла (рис.2.12,а).

Это эквивалентно увеличению площади одного из коллекторов и уменьшению площади другого. В результате происходит увеличение тока одного коллектора и уменьшение тока другого коллектора. Расстояние, на которое отклонятся носители заряда под действием индукции магнитного поля, определяется следующим выражением [45]:

$$x = W_k \operatorname{tg} \frac{W_k}{W_k} \mu_n^* B, \quad (2.26)$$

где W_k – толщина коллектора.

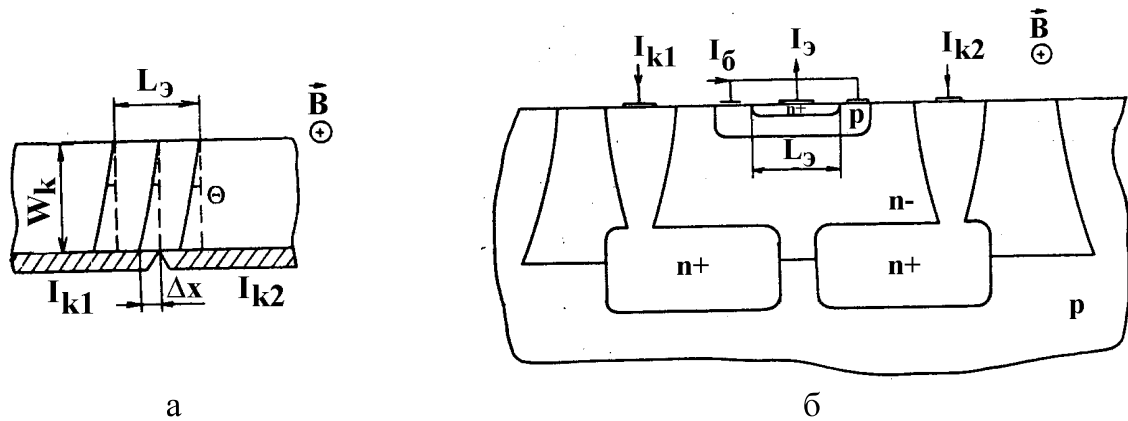


Рис.2.12. Двухколлекторный биполярный магнитотранзистор

Таким образом, изменение токов первого и второго коллекторов под действием внешнего магнитного поля описывается следующим выражением [45]:

$$I_{\kappa 1, \kappa 2} = \frac{x}{L_3} \frac{W_k \mu^* B}{L_3 \kappa} \quad (2.27)$$

Сенсоры магнитного поля, по сравнению с сенсорами механических величин, имеют существенное преимущество при использовании их в качестве элементной базы систем ориентации, навигации и управления. Это преимущество заключается в том, что сенсоры магнитного поля могут определять положение объекта в пространстве, находящегося в состоянии покоя. Тогда как сенсоры механических величин – только в состоянии движения.

Технология изготовления сенсоров магнитного поля МСТ полностью совместима с технологией изготовления ИС, что позволяет создавать сенсорные элементы данного вида совместно с устройствами обработки, хранения и передачи информации на одном кристалле.

3. АКТЮАТОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Актюатор – это механическое устройство, которое преобразовывает различные виды энергии (электрическая, химическая или термическая) в механическую работу, излучение тепла и света (рис.3.1) [14,42].

В настоящее время разработаны термические, термопневматические, пьезоэлектрические, электростатические и магнитные актюаторы [7,9,12,48-52].

Термоактюаторы были разработаны одними из первых и использовались в сенсорах измерения и определения потоков жидкости и газов в качестве нагревательных элементов [2,48].

Основное применение термоактюаторы нашли в механизмах горизонтального и вертикального поворота структур элементов МСТ [2,51].

Принцип работы термоактюаторов основан на тепловом расширении структурных материалов элементов микросистемной техники.

Если при однородном нагреве температура твердого тела возрастает на

T , то тело испытывает деформацию, описываемую следующим выражением (рис.3.2) [2]:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T, \quad (3.1)$$

где α – коэффициент теплового расширения; T – температура.

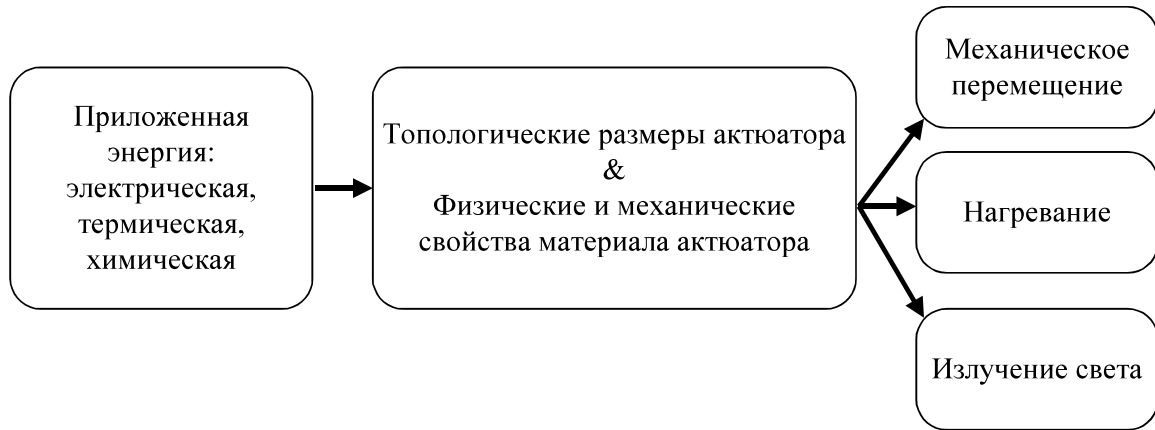


Рис.3.1. Преобразование входной энергии в работу актюатора

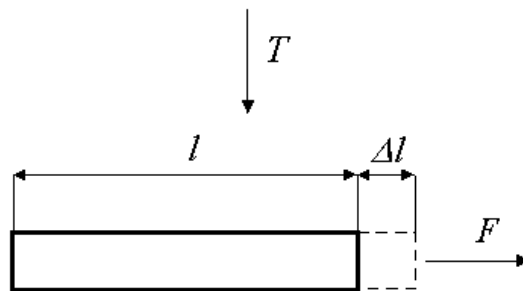


Рис.3.2. Деформация термоактюатора при нагреве

Деформацией твердого тела называется изменение его размеров и объема:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (3.2)$$

где Δl – абсолютное удлинение; l – первоначальный размер тела.

Подставив (3.2) в (3.1), получим выражение, позволяющее определять абсолютное удлинение термоактюатора:

$$\Delta l = l \alpha \Delta T. \quad (3.3)$$

Напряжением называется физическая величина, равная упругой силе, приходящейся на единицу площади сечения тела:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (3.4)$$

где F – сила; S – площадь сечения, расположенная перпендикулярно нормали силы F .

Согласно закону Гука, сила растяжения или сжатия, приложенная к телу в форме стержня, вызывает изменение длины тела l . Величина l зависит от размеров стержня, материала и величины приложенной силы:

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (3.5)$$

где E – модуль Юнга.

Подставив (3.1) и (3.4) в (3.5), получим выражение для определения силы, создаваемой термоактюатором [2]:

$$F_m = w h E \alpha T, \quad (3.6)$$

где w – ширина; h – толщина.

Тепловая деформация зависит от кристаллографической ориентации структурного материала. Таким образом, для анизотропных сред, выражение (3.1) примет вид

$$\varepsilon_{ij} = \alpha_{ij} T, \quad (3.7)$$

Термоактюаторные элементы МСТ изготавливаются по технологии поверхностной микрообработки и MUMPs-технологии.

Дальнейшее развитие термоактюаторы получили в виде термопневматических актюаторов. Данный тип актюаторов содержит нагревательный элемент и герметичную полость с упругой мембраной (рис.3.3).

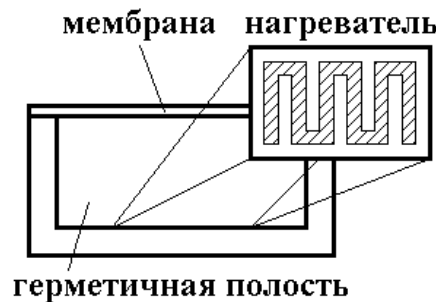


Рис.3.3. Термопневматический актюатор

Нагреватель представляет собой полупроводниковый резистор меандрового типа. Электрический ток, протекая через резистор, нагревает его. Количество теплоты, выделяемое в нагревателе, определяется следующим образом [52]:

$$Q = \frac{U^2}{R} t, \quad (3.8)$$

где U – напряжение на нагревателе; t – время прохождения тока через нагреватель; R – сопротивление нагревателя.

В результате происходит расширение газовой среды в герметичной области, что в свою очередь приводит к деформации мембраны [52]. Так как объем герметичной полости остается постоянным, то изменение давления в полости описывается следующим выражением [52]:

$$p_T = p_0 \beta T, \quad (3.9)$$

где P_0 – давление газа до нагревания; β – коэффициент объемного расширения; T – температура нагревания.

Коэффициент объемного расширения практически одинаков у всех газов и с хорошим приближением равен коэффициенту объемного расширения идеального газа: $\beta = 0,003664 \text{ K}^{-1}$ [52].

Сила, создаваемая термопневматическим актюатором будет определяться следующим выражением [52]:

$$F_{mn} = S \beta P_0 T, \quad (3.10)$$

где S – площадь мембраны.

Термопневматические актюаторы изготавливаются по технологии объемной микрообработки и LIGA-технологии.

Более простым вариантом термопневматического актюатора является пьезоэлектрический актюатор. Данный тип актюаторов содержит пьезоэлектрический диск и упругую мембрану (рис.3.4) [53].

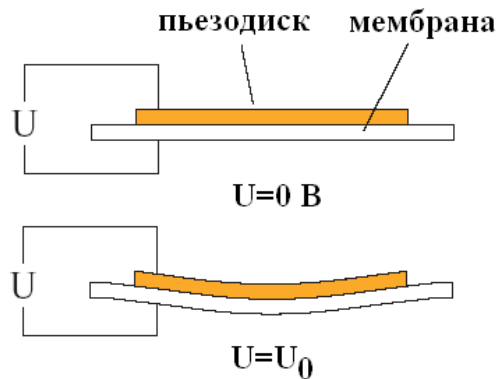


Рис.3.4. Структура пьезоэлектрического актюатора

В основу работы пьезоэлектрических актюаторов положен обратный пьезоэлектрический эффект: под действием электрического поля в пьезоэлектриках появляется механическая деформация.

При обратном пьезоэлектрическом эффекте электрическое поле и деформацию актюатора связывают те же пьезоэлектрические коэффициенты, которые связывают напряжение и поляризацию при прямом эффекте [53]:

$$\varepsilon_{ij} = \pi_{ij} \frac{E_i}{T}, \quad (3.11)$$

где ε_{ij} – тензор относительной деформации; π_{ij} – тензор пьезокоэффициентов материалов; E_i – напряженность электрического поля.

В качестве материалов пьезоэлектриков используются кварц, LiTaO_3 и ZnO [53].

Данный тип актюаторных элементов изготавливается с использованием технологии объемной микрообработки и LIGA-технологии.

Следующим типом актюаторных элементов МСТ являются электростатические актюаторы. В общем виде электростатический актюатор содержит подвижный и неподвижный электроды (рис.3.5) [2,9,12,42].



Рис.3.5. Электростатический актюатор

В качестве подвижного электрода выступают консольные балки и мембраны.

Принцип действия данных актюаторов основан на возникновении электростатической силы между подвижным и неподвижным электродами.

При подаче отклоняющего напряжения на неподвижный электрод относительно подвижного, на последний начинает действовать электростатическая сила, определяемая выражением [54]:

$$dF_{эл} = E dq, \quad (3.12)$$

где E – напряженность электрического поля; q – заряд электрона.

Поскольку [54]

$$dq = C dU; \quad (3.13)$$

$$E = \frac{U}{d}, \quad (3.14)$$

выражение (3.12) примет вид [54]

$$dF_{эл} = \frac{C}{d} U dU, \quad (3.15)$$

то электростатическая сила, действующая на подвижный электрод будет определяться следующим выражением [54]:

$$F_{эл} = \frac{C}{d} \int_0^U U dU = \frac{C U^2}{2d}, \quad (3.16)$$

где U – отклоняющее напряжение; d – расстояние между подвижным и неподвижным электродами; C – емкость, создаваемая подвижным и неподвижным электродами, определяемая выражением:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (3.17)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора; ϵ_0 – электрическая постоянная ($8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); S – площадь подвижного электрода.

Подставив (3.17) в (3.16), получим выражение для определения силы, действующей на подвижный электрод [54]:

$$F_{эл} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d^2} U^2. \quad (3.18)$$

При подаче отклоняющего напряжения U между подвижным и неподвижным электродами возникает электростатическое взаимодействие и подвижный электрод притягивается к неподвижному. По мере отклонения подвижного электрода от первоначального положения расстояние между электродами d будет уменьшаться, что, согласно выражению (3.18), приводит к увеличению электростатической силы $F_{эл}$. Следовательно, при расчете электростатической силы, действующей на подвижный электрод относительно неподвижного, необходимо учитывать уже совершенное отклонение [54]:

$$F_{эл} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d^2 y^2} U^2. \quad (3.19)$$

При изготовлении электростатических актюаторов могут использоваться технологии поверхностной и объемной микрообработки и MUMPs-технология.

Магнитные актюаторы являются новым типом актюаторных элементов МСТ. Принцип их работы основан на деформации поликремниевых балок или мембран, с нанесенным на них слоем пермаллоя (NiFe), под действием внешнего магнитного поля (рис.3.6).

При помещении во внешнее магнитное поле генерируются две компоненты магнитной силы F_1 и F_2 , определяемые выражениями [48,49]:

$$F_1 = q_m H; \quad (3.20)$$

$$F_2 = q_m H, \quad (3.21)$$

где q_m – магнитный заряд; H – напряженность внешнего магнитного поля.

Крутящий момент, создаваемый магнитным актюатором, определяется с помощью следующего выражения [48,49]:

$$M = q_m l_{NiFe} H \sin \alpha, \quad (3.22)$$

где l_{NiFe} – длина слоя NiFe; α – угол между направлением напряженности магнитного поля и плоскостью актюатора.

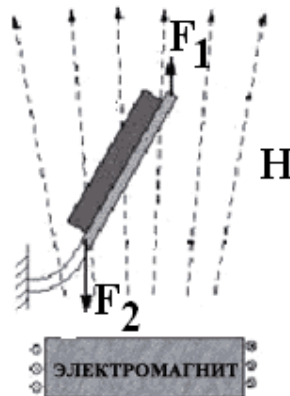


Рис.3.6. Магнитный актюатор

Данный тип актюаторов нашел широкое применение в интегральной микросборке элементов МСТ [77-80].

Основной недостаток магнитных актюаторов – необходимость использования внешних источников магнитного поля.

Данный тип актюаторов изготавливается по MUMPs-технологии.

В настоящее время актюаторные элементы микросистемной техники широко используются при создании актюаторных микросистем, таких как микронасосы, интегральные микрозеркала и микромеханические ключи [4,7,8].

3.1. Микронасосы

По принципу функционирования микронасосы делятся на два класса [52,55-59].

К первому классу относятся немеханические микронасосы (не содержащие подвижные микромеханические части). Данный класс включает микронасосы на основе электрогидродинамического, электроосмотического и ультразвукового эффектов.

Ко второму классу, самому распространенному, относятся механические микронасосы (содержащие подвижные микромеханические части) с активными и пассивными клапанами.

3.1.1. Электрогидродинамические микронасосы

Наибольшее распространение, в классе немеханических микронасосов получили электрогидродинамические.

Электрогидродинамический микронасос представляет собой инжекционный микронасос, состоящий из двух электродов сетчатой структуры, размещенных один над другим и разделенных слоем диэлектрика (рис.3.7) [55].

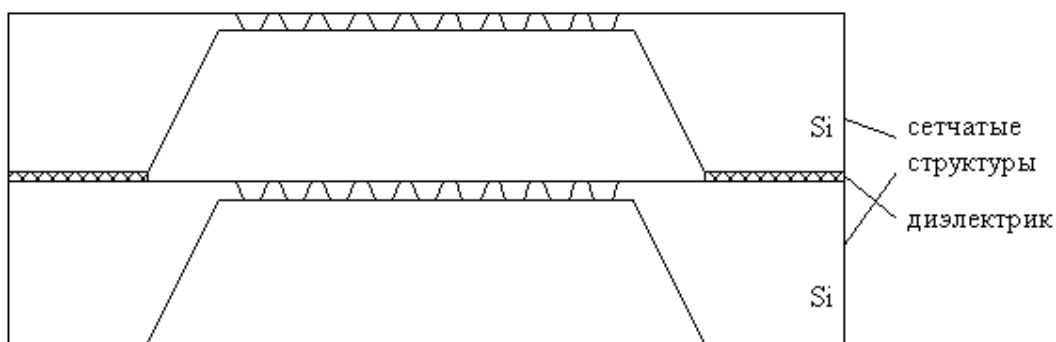


Рис.3.7. Микронасос электрогидродинамического типа

Если микронасос погрузить в полярную жидкость (содержащую ионы и диполи) и к двум сетчатым структурам приложить напряжение, то в результате взаимодействия между высокими электрическими полями и ионами или диполями жидкости возникнут силы, действующие на частицы жидкости. Частицы

жидкости будут ускоряться между структурами, и возникнет движение жидкости через сопла в одном направлении. Перестройка работы электрогидродинамического микронасоса заключается только в приложении к структурам обратного напряжения.

С помощью электрогидродинамических микронасосов можно перекачивать различные масла и полярные жидкости (этиловый и метиловый спирты, ацетон, фреон) и множество других непроводящих жидкостей с удельным сопротивлением, лежащим в диапазоне от 10^{10} до 10^{14} Ом*см. Обычную воду таким путем перекачивать нельзя, так как под воздействием электрических полей в ней начинается электролиз [55].

Возможными применениями данного класса микронасосов являются миниатюрные системы охлаждения электронных компонентов, основанные на использовании этилового и метилового спиртов. В других возможных применениях наиболее целесообразно применять микронасосы второго класса, содержащие подвижные мембраны и клапана.

3.1.2. Механические микронасосы с активными клапанами

В качестве активационного механизма в механических микронасосах с активными клапанами используются пьезоэлектрические и термопневматические актюаторы. Микронасосы данного вида содержат несколько активных клапанов, расположенных последовательно друг за другом (рис.3.8) [52,57,59].

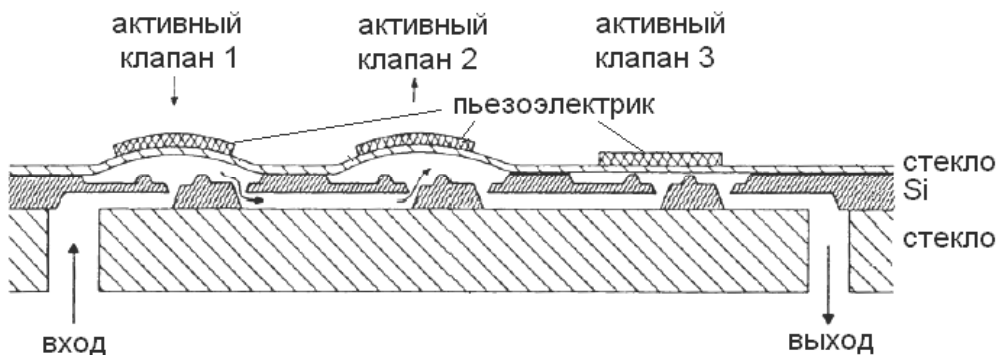


Рис.3.8. Механический микронасос с активными клапанами

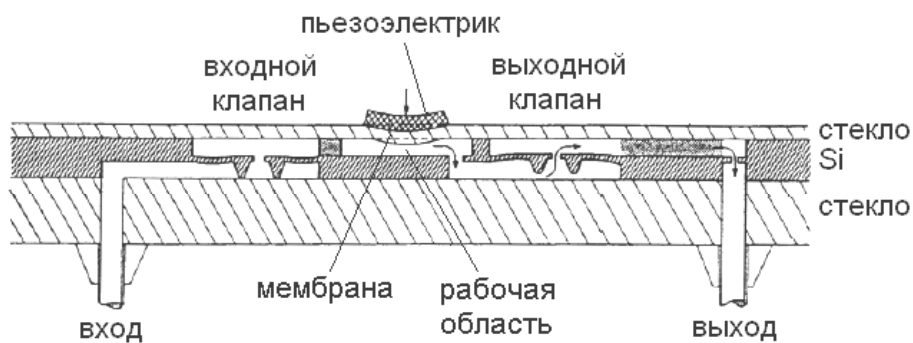
При включении актюатора первого активного клапана происходит деформация мембраны, что приводит к открытию первого клапана. Жидкость со входа микронасоса через открытый первый клапан поступает на вход второго активного клапана. Выключение актюатора первого клапана происходит одновременно с включением актюатора второго клапана. Когда второй клапан открывается, жидкость поступает на вход третьего клапана. Далее производится одновременное открытие первого и третьего клапанов и закрытие второго. Жидкость с входа третьего клапана попадает на выход микронасоса, а жидкость с входа микронасоса попадает на вход второго активного клапана. Далее цикл повторяется.

Достоинством механических микронасосов с активными клапанами является то, что они позволяют перекачивать жидкость в обоих направлениях без изменения конструкции. Перестройка работы микронасоса заключается только в обратной последовательности включения актюаторов активных клапанов.

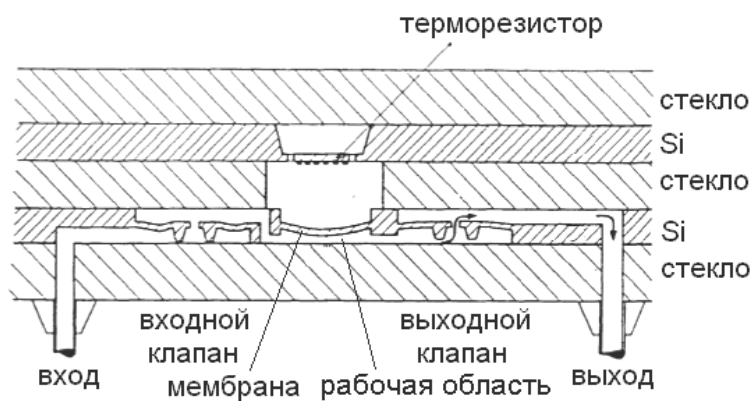
3.1.3. Механические микронасосы с пассивными клапанами

Поршневой механический микронасос с пассивными клапанами содержит рабочую область с подвижной мембраной, управляемой актюатором, входной и выходной клапаны, управляемые потоком жидкости (рис.3.9) [52,57,59].

По принципу действия используемого актюатора поршневые механические микронасосы разделяют на электростатические, пьезоэлектрические (рис.3.9,а), магнитные и термопневматические (рис.3.9,б) [52,57,59].



а



б

Рис.3.9. Поршневой механический микронасос:
а – пьезоэлектрический;
б – термопневматический

При включении актюатора, происходит деформация подвижной мембраны. Что в свою очередь приводит к изменению объема рабочей области микронасоса. В результате возникает разность давлений жидкостей, находящихся в рабочей области, на входе и на выходе микронасоса. Под воздействием жидкости, находящейся в рабочей области, входной клапан закрывается, а выходной — открывается. При этом избыточная жидкость удаляется из рабочей области микронасоса через выходной клапан. Давления жидкости в рабочей области, на входе и на выходе микронасоса выравниваются.

При выключении актюатора подвижная мембрана возвращается в первоначальное положение и объем рабочей области микронасоса восстанавливается. В результате снова возникает разность давлений жидкостей, находящихся в рабочей области, на входе и на выходе микронасоса. Под воздействием жидкости, находящейся на входе микронасоса, входной клапан открывается, а под воздействием жидкости, находящейся на выходе микронасоса, выходной клапан закрывается. Рабочая область заполняется жидкостью через входной клапан.

Поршневые механические микронасосы получили более широкое распространение, чем механические микронасосы с активными клапанами, т.к. они позволяют перекачивать больший диапазон жидкостей [52,57,59].

Для увеличения объемов перекачиваемой жидкости микронасосы изготавливают с несколькими рабочими областями.

На рис.3.10 представлена конструкция двухкамерного механического микронасоса с пьезоэлектрической активацией [59].

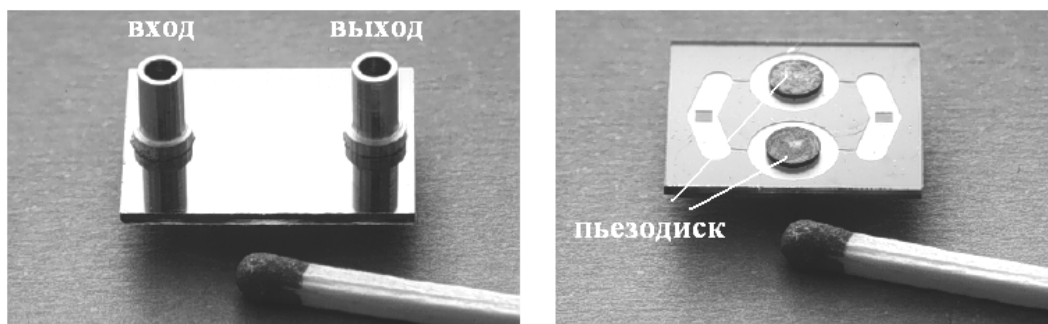


Рис.3.10. Двухкамерный пьезоэлектрический микронасос

Механические микросмесители строятся на основе поршневых механических микронасосов. Основное отличие микросмесителей от микронасосов состоит в том, что конструкция микросмесителя содержит несколько входных клапанов и только один выходной.

В настоящее время не существует интегральных конструкций механических микронасосов и микросмесителей. Отдельные части микронасосов (микросмесителей) изготавливаются в разных подложках с помощью технологий объемной микрообработки или LIGA. Затем изготовленные части собираются с помощью операции микросборки.

3.2. Интегральные микрозеркала

Интегральные микрозеркала с электростатической активацией находят широкое применение в миниатюрных робототехнических системах (в качестве оптических ключей) и системах анализа и обработки изображений (для отклонения лазерного луча и/или светового потока) [11,54,60-62].

На рис.3.11 приведена структура микрозеркала, изготовленного с помощью технологии объемной микрообработки [11,54,60-62].

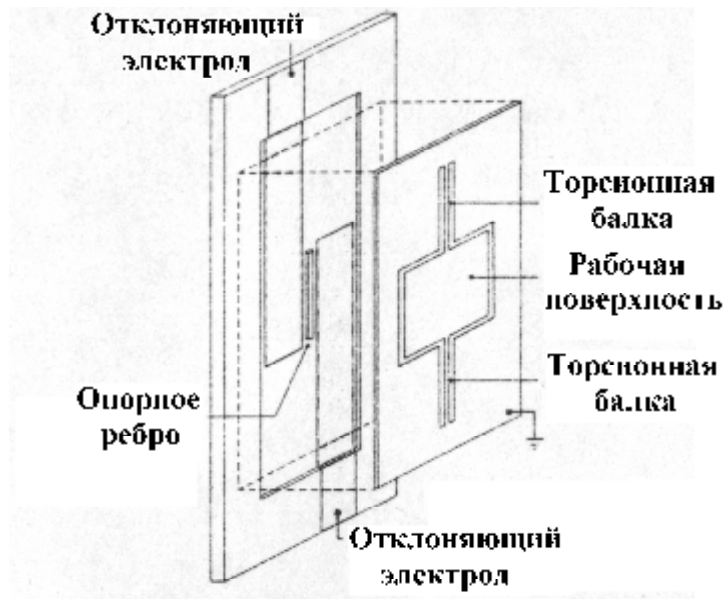


Рис.3.11. Микрозеркало с электростатической активацией, изготовленное с использованием технологии объемной микрообработки

Для отклонения структуры микрозеркала используются два электростатических актюатора, создаваемых структурой микрозеркала и двумя электродами, расположенными под структурой микрозеркала. Структуру микрозеркала заземляют и на отклоняющие электроды попеременно подают напряжение. Между структурой микрозеркала и отклоняющими электродами возникает электростатическая сила, которая отклоняет микрозеркало то в одну, то в другую сторону. Движение микрозеркала осуществляется за счет кручения торсионных балок.

Изготовление данного микрозеркала с помощью технологии объемной микрообработки затрудняет его использование в интегральных микрооптико-электромеханических системах.

На рис.3.12 приведена структура интегрального микрозеркала с электростатической активацией, изготовленного с использованием MUMPs-технологии [11,54,60-62].

Отклонение структуры микрозеркала осуществляется с помощью электростатического актюатора, создаваемого пластинами, выполненными из слоя поликремния (poly0) и второго структурного слоя (poly2).

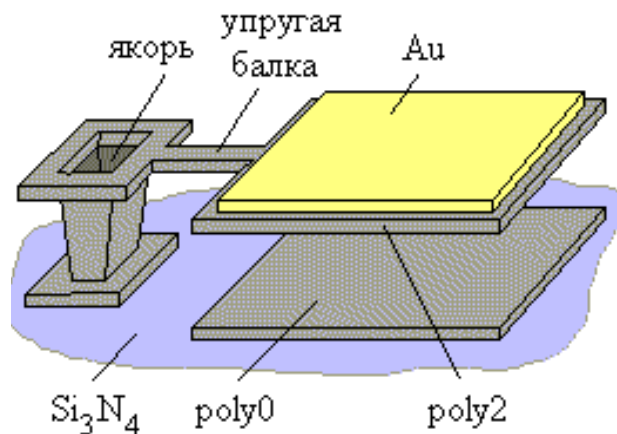


Рис.3.12. Интегральное микрозеркало с электростатической активацией, изготовленное с использованием MUMPs-технологии

Структуру микрозеркала заземляют (poly2) и на отклоняющий электрод (poly0) подают напряжение. Между структурой микрозеркала и отклоняющим электродом возникает электростатическая сила, которая отклоняет микрозеркало. Движение микрозеркала осуществляется за счет изгиба упругой консольной балки.

Недостатками данной структуры являются отсутствие функциональной возможности отклонения микрозеркала в обе стороны и потеря площади кристалла, связанная с необходимостью размещения якоря (anchor2) и упругой консольной балки микрозеркала.

На рис. 3.13 приведена структура интегрального микрозеркала с электростатической активацией, изготавливаемого по технологии поверхностной микрообработки [54].

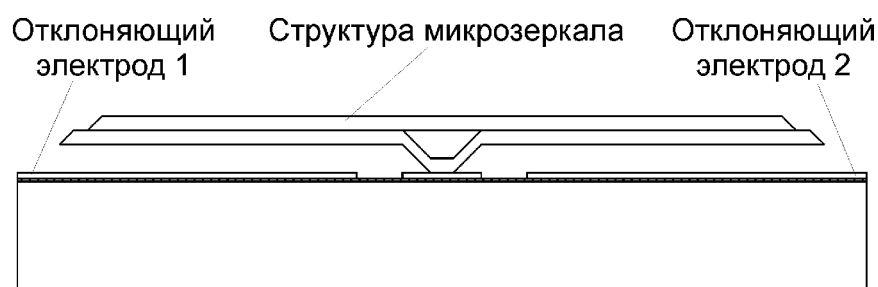


Рис. 3.13. Структура интегрального микрозеркала с электростатической активацией

При подаче напряжения на один из отклоняющих электродов между ним и структурой микрозеркала возникает электростатическая сила, которая притягивает микрозеркало к отклоняющему электроду. Когда отклоняющее напряжение убирается, микрозеркало под действием силы упругости возвращается в исходное положение.

Электростатическая сила F_{ai} , возникающая между отклоняющим электродом и структурой микрзеркала, определяется следующим выражением [54]:

$$F_{ai} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 L_{ai} W_{ai} U_{ai}^2}{d^2}, \quad (3.23)$$

где L_{ai} , W_{ai} – длина и ширина части отклоняющего электрода, расположенной под структурой микрзеркала; U_{ai} – отклоняющее напряжение.

В выражении (3.23) индекс i принимает значения 1, 2 для соответствующих отклоняющих электродов.

Под действием силы F_{ai} структура микрзеркала притягивается к отклоняющему электроду. По закону Гука, силе F_{ai} , действующей на микрзеркало, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю электростатической силе и противоположная по направлению [54]:

$$F_{ai} = F_{упр} = 2k\gamma. \quad (3.24)$$

Жесткость пластин крепления определяется следующим выражением:

$$k = \frac{E J}{l_k^3}, \quad (3.25)$$

где l_k – длина пластин крепления.

Под действием электростатической силы F_{ai} пластины крепления будут изгибаться по окружностям с центром в точке 0, радиусом изгиба R и углом изгиба γ (рис. 3.14) [54].

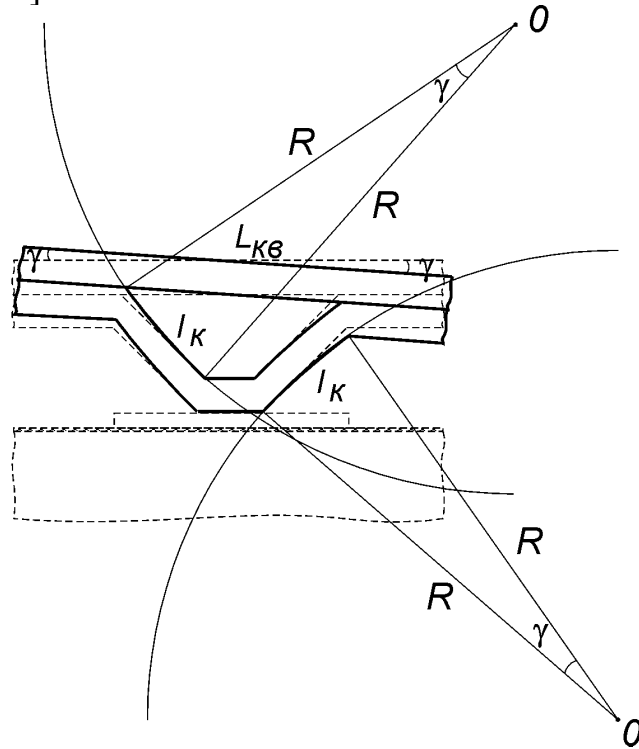


Рис. 3.14. Модель движения структуры микрзеркала

Угол изгиба пластин крепления определяется выражением [54]:

$$\gamma = \frac{1}{4} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 L_{ai} W_{ai} U_{ai}^2}{k l_k d x_{ai}}, \quad (3.26)$$

где x_{ai} – отклонение, совершаемое структурой микрозеркала в сторону отклоняющего электрода.

Напряжения замыкания, при котором произойдет контакт структуры микрозеркала и отклоняющего электрода, определяется следующим выражением [54]:

$$U_{ai}^* = \frac{4}{3} \gamma_{\max} \sqrt{\frac{k l_k d}{3 \varepsilon \varepsilon_0 W_{ai}}}. \quad (3.27)$$

На рис. 3.15 представлена зависимость отклонения структуры микрозеркала x от отклоняющего напряжения U_{ai} .

Срез зависимости отклонения структуры микрозеркала x от отклоняющего напряжения U_{ai} (рис. 3.15) соответствует режиму замыкания структуры микрозеркала и отклоняющего электрода [54].

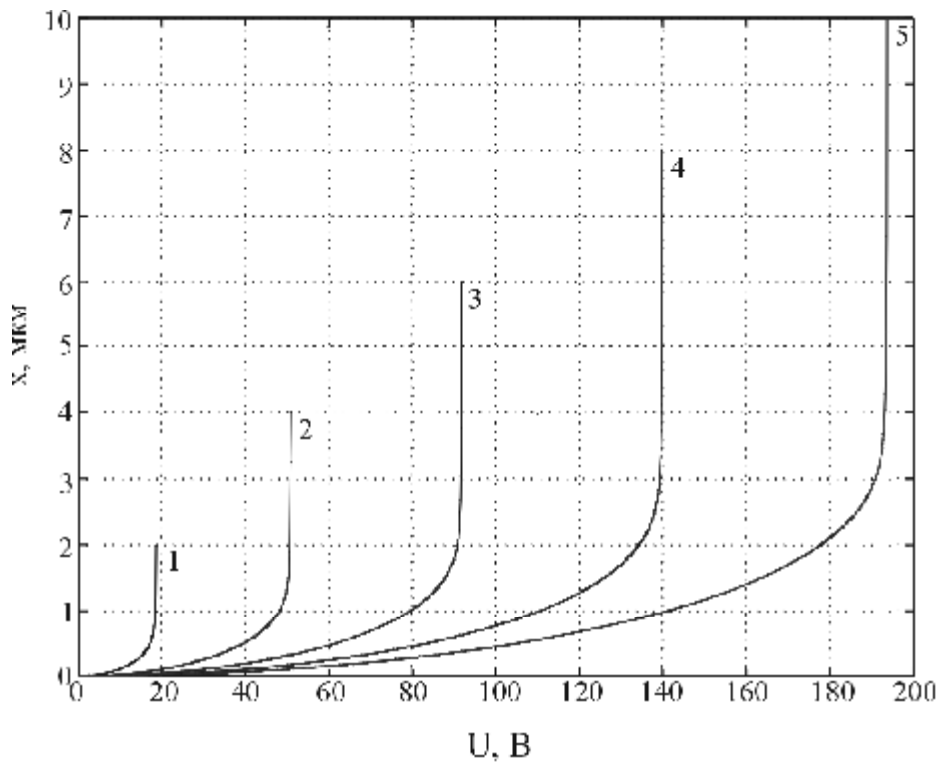


Рис. 3.15. Зависимость отклонения структуры микрозеркала x от отклоняющего напряжения U_{ai} :

1 – $d=2$ мкм; 2 – $d=4$ мкм; 3 – $d=6$ мкм;
4 – $d=8$ мкм; 5 – $d=10$ мкм

Как видно на рис.3.15, при достижении отклоняющим напряжением значения напряжения замыкания возникает эффект неконтролируемого электростатического притяжения, т.е. микромеханическая структура теряет стабильность. Это возникает из-за преобладания электростатической силы над силой упругости.

В настоящее время разработано достаточно большое количество одно- и двуосных микромеханических зеркал с электростатической активацией.

На рис. 3.16 – 3.17 представлены структуры интегральных микрозеркал с электростатической активацией, получившие наиболее широкое распространение [60-62].

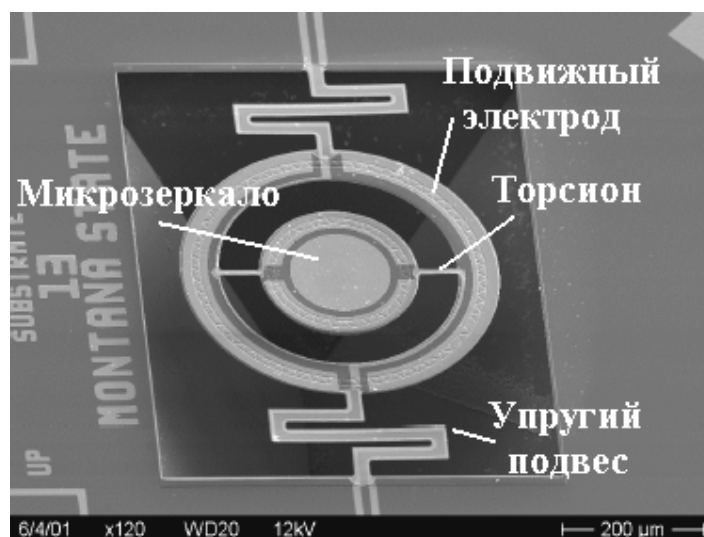


Рис. 3.16. Интегральное двуосное микрозеркало, выполненное по технологии объемной микрообработки

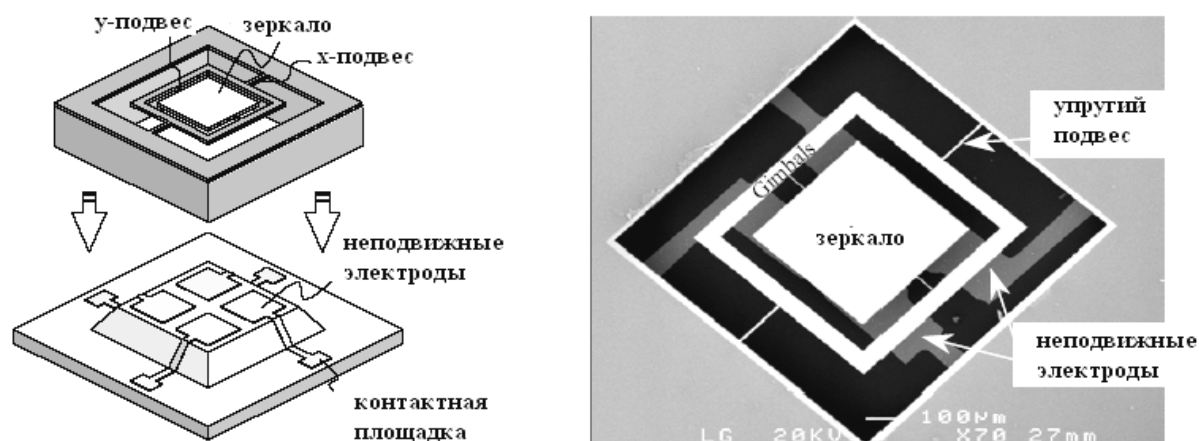


Рис. 3.17. Двуосное микрозеркало, выполненное с использованием операции микросборки

Для получения больших углов отклонения микрозеркал необходимо обеспечить большее расстояние между структурой микрозеркала и отклоняющих электродов. Использование технологии поверхностной микрообработки при изготовлении микрозеркал не позволяет получить больших зазоров, а применение объемной микрообработки снижает интеграцию элементов МСТ с ИС. Для устранения данного недостатка при изготовлении микрозеркал по технологиям поверхностной обработки применяется самосборка с использованием электростатических двигателей (ЭМД).

На рис.3.18 представлено интегральное двуслойное микрозеркало, изготавливаемое с использованием технологии самосборки с помощью электростатических микродвигателей [60-62].

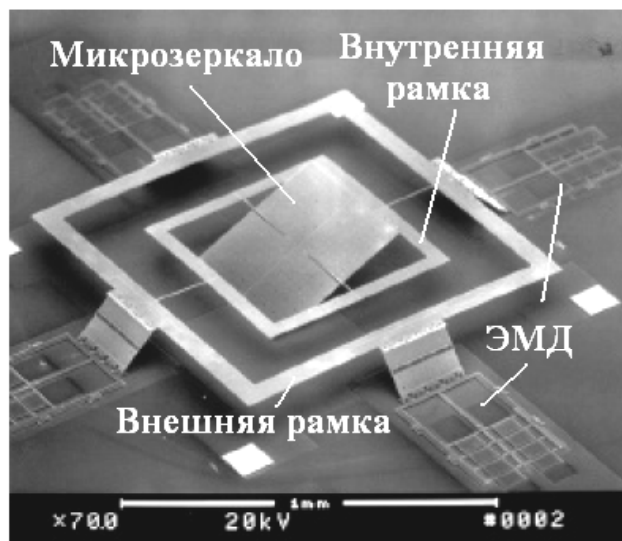


Рис.3.18. Интегральное микрозеркало с ЭМД

Данное микромеханическое устройство изготавливается в рамках MUMPs-технологии.

Для уменьшения энергопотребления электростатических актюаторов, входящих в состав микрозеркал, целесообразно использовать гребенчатые структуры, обладающие большей емкостью по сравнению с плоскими.

На рис. 3.19 представлено интегральное микромеханическое зеркало с гребенчатыми электростатическими актюаторами [62].

При подаче отклоняющего напряжения на подвижный электрод, относительно неподвижного, на упругий подвес начинает действовать крутящий момент силы, определяемый выражением

$$M = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\theta}, \quad (3.28)$$

где U – напряжение; $\frac{dC}{d\theta}$ – изменение емкости между подвижным и неподвижным электродами по мере отклонения микрозеркала от первоначального положения.

Интегральное микрозеркало отклоняется от своего первоначального положения (рис. 3.20).

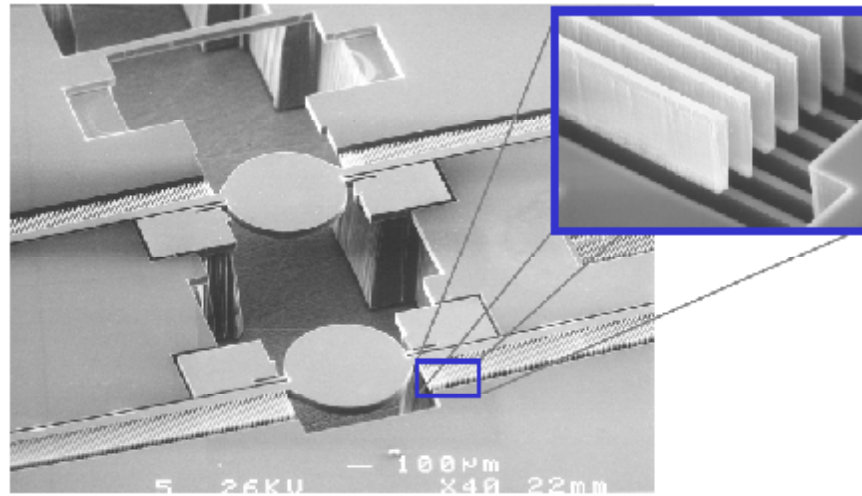


Рис. 3.19. Интегральное микромеханическое зеркало

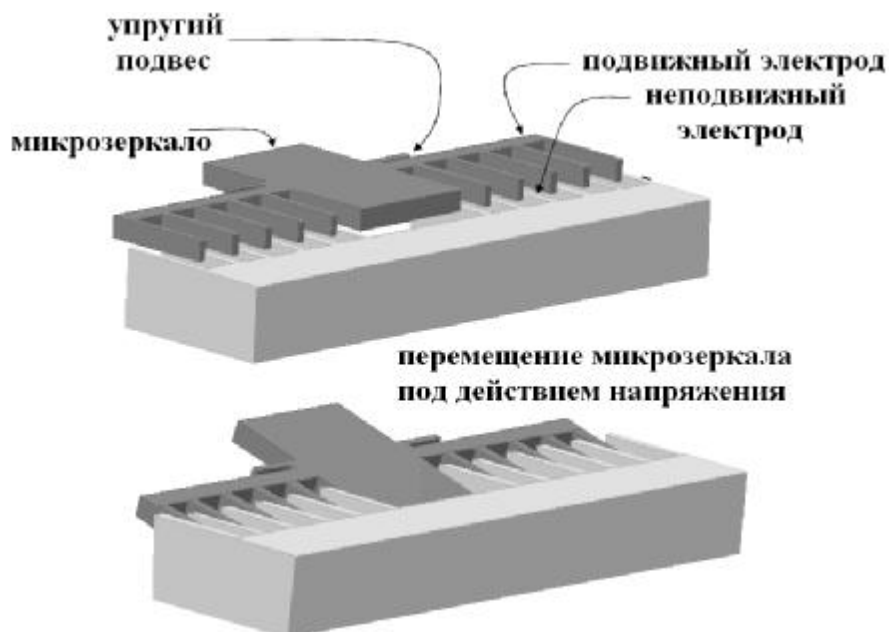


Рис. 3.20. Перемещение интегрального микромеханического зеркала под действием отклоняющего напряжения

Если толщина пальцев подвижного и неподвижного электродов превышает величину зазора между ними, то крутящий момент может быть определен без учета краевых полей. В этом случае величина емкости между подвижным и неподвижным электродами будет пропорциональна площади перекрытия электродов (рис. 3.21) [62]:

$$C = 2 \frac{N \varepsilon_0}{g} S(\theta), \quad (3.29)$$

где N – количество пальцев на подвижном электроде; g – зазор между пальцами подвижного и неподвижного электродов; θ – угол поворота микрозеркала.

Изменение площади перекрытия электродов является нелинейной функцией от угла поворота микрозеркала и будет увеличиваться до тех пор, пока верх пальцев подвижного электрода не поравняется с верхом пальцев неподвижного электрода (рис. 3.21).

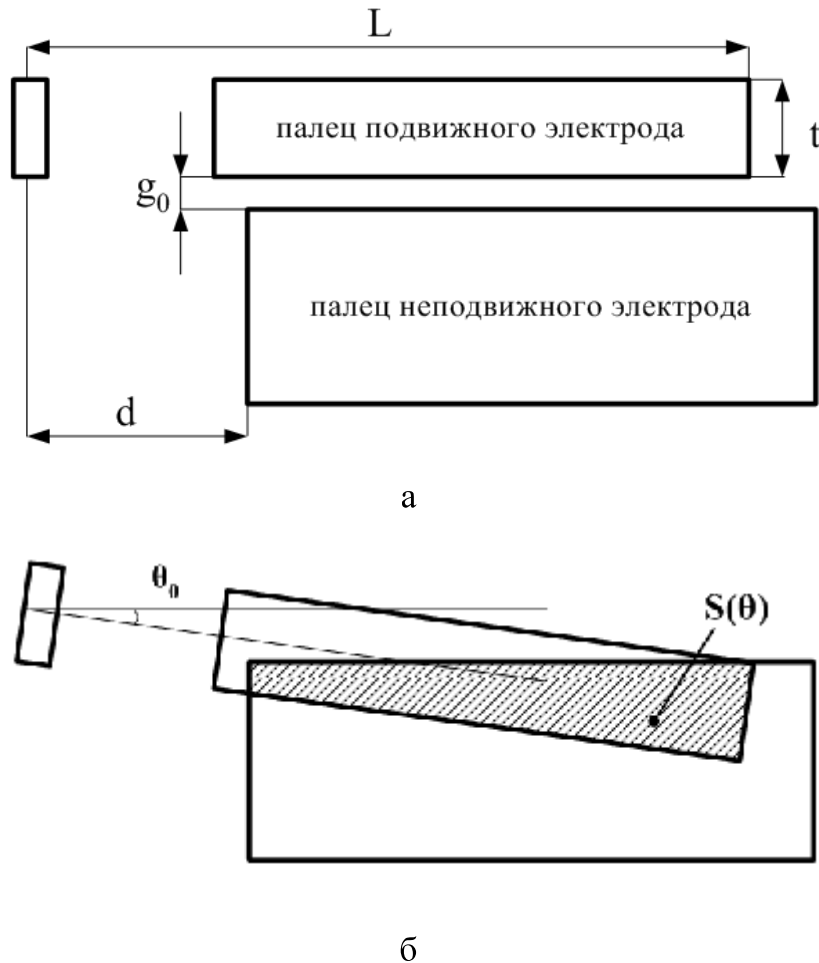


Рис. 3.21. Модель движения электростатического гребенчатого актюатора

В этом случае угол поворота достигнет некоторого значения ($\theta = \theta_0$) и максимальный крутящий момент будет определяться выражением [62]:

$$M_{\max} = \frac{U_{\max}^2 N \varepsilon_0 (L^2 - d^2)}{2 g}, \quad (3.30)$$

где L – расстояние от оси вращения подвижного электрода до его края; d – расстояние от оси вращения до края неподвижного электрода.

Максимальный угол поворота будет определяться следующим выражени-

ем [62]:

$$\theta_0 = \sin \frac{1}{L} \frac{t - g_0}{2}, \quad (3.31)$$

где t – толщина пальцев подвижного электрода; g_0 – расстояние от верхнего края неподвижного электрода до нижнего края подвижного электрода.

На рис. 3.22 представлена зависимость изменения $\frac{dC}{d\theta}$ от длины пальцев подвижного электрода [62].

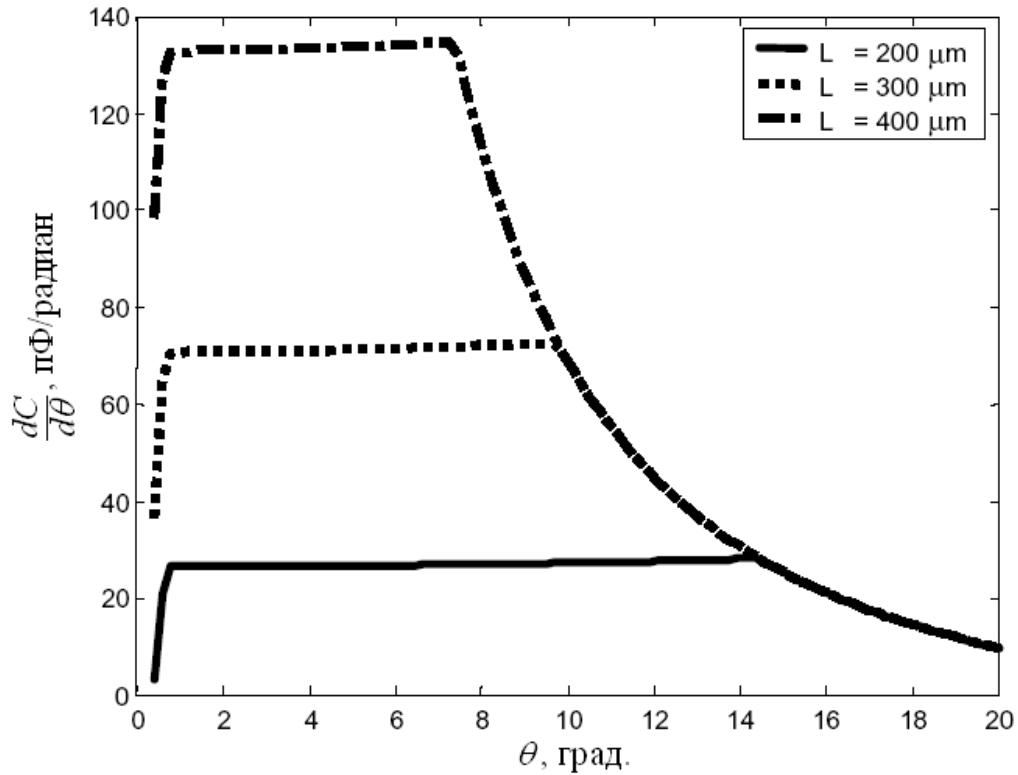


Рис. 3.22. Изменения $\frac{dC}{d\theta}$ от длины пальцев подвижного электрода

Изменение угла поворота от приложенного напряжения описывается трансцендентным уравнением [62]:

$$\theta(U) = \frac{M(\theta, U)}{k_\theta} \frac{U^2}{2} \frac{dC(\theta)}{d\theta}, \quad (3.32)$$

где k_θ – угловая жесткость упругого подвеса микрозеркала, определяемая с помощью следующего выражения [62]:

$$k_{\theta} = \frac{M_{\max}}{\theta_0} \frac{U_{\max}^2 N \epsilon_0}{2 g \theta_0} \quad (3.33)$$

Резонансная частота определяется следующим выражением [62]:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{3 U_{\max}^2 N \epsilon_0}{2 g \rho t_m w_m (\lambda N_p)^3}} \quad (3.34)$$

где ρ – плотность; t_m – толщина микрозеркала; w_m – ширина микрозеркала; λ – длина волны; N_p – оптическое разрешение микрозеркала, определяемая выражением

$$N_p = \frac{8 \theta_0 L_m}{a \lambda}, \quad (3.35)$$

где L_m – полудлина микрозеркала; a – фактор модели, определяемый экспериментально (для квадратного микрозеркала $a = 1$).

В настоящее время разработано большое количество интегральных микрозеркал с гребенчатыми электростатическими актюаторами.

На рис. 3.23 представлены структуры интегральных микрозеркал с гребенчатыми электростатическими актюаторами, получившие широкое распространение [60-62].

3.3. Интегральные микромеханические ключи

Интегральные микромеханические ключи находят широкое применение в миниатюрных робототехнических системах в качестве логических элементов.

В настоящее время разработано достаточно большое количество микромеханических ключей, изготавливаемых из алюминия и золота, что сужает области их применения, т.к. металлические ключи более чувствительны к ускорению, чем микромеханические, выполненные из полупроводниковых материалов. Кроме того, при изготовлении интегральных микромеханических ключей из металла необходимо использовать один жертвенный слой, что затрудняет их изготовление в одном технологическом процессе совместно с другими элементами МСТ и ИС [63,64].

Микромеханические ключи, в которых в качестве структурного материала используется поликремний, изготавливаются с помощью технологии поверхностной микрообработки, что в свою очередь позволит интегрально изготавливать их в одном технологическом процессе совместно с другими элементами МСТ и ИС.

Принцип действия микромеханических ключей может быть электростатическим, магнитным или электромагнитным. Каждый из перечисленных принци-

пов имеет свои достоинства и недостатки. Электромагнитная активация микро-механических ключей позволяет снизить напряжения срабатывания, но при высоком потреблении тока. Преимущество микромеханических ключей с электростатической активацией заключается в отсутствии потребления тока, а недостаток – в высоком напряжении срабатывания (5-100 В). Ключи с таким видом активации применяются в микросистемах, для которых важным фактором является низкая потребляемая мощность [4,64,65].

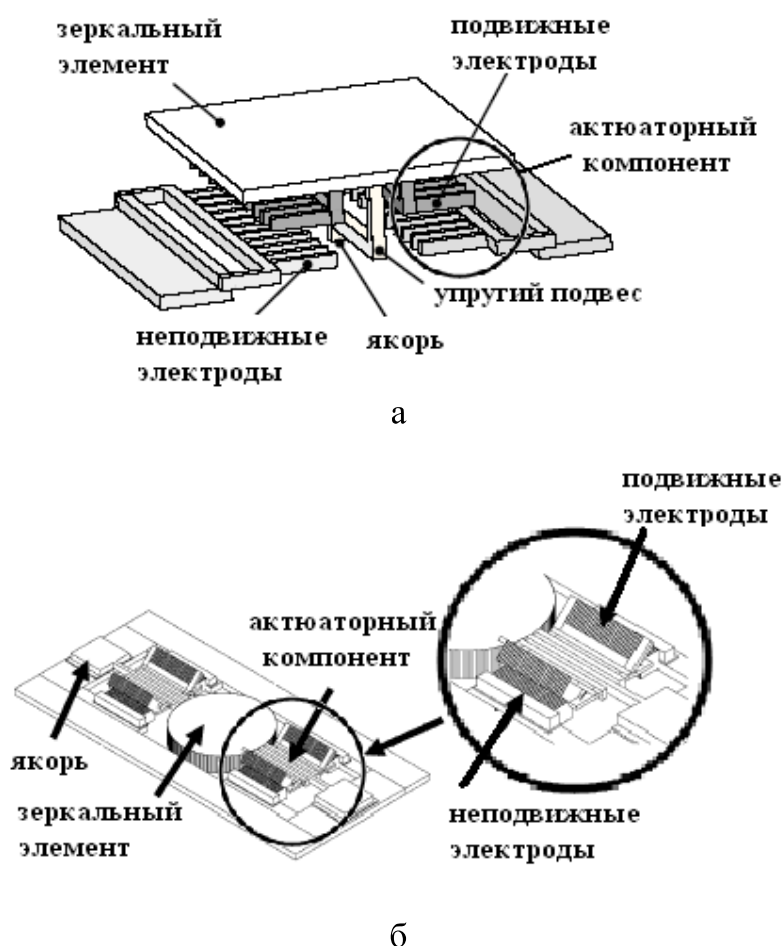


Рис. 3.23. Интегральные микрозеркала с гребенчатыми электростатическими актюаторами:
 а – одноосное микрозеркало, изготавливаемое в рамках технологии поверхностной микрообработки;
 б – одноосное микрозеркало, изготавливаемое в рамках технологии объемной микрообработки

Большинство микромеханических ключей с электростатической активацией, в качестве подвижного элемента, содержат консольную балку. Область, к которой непосредственно присоединена консольная балка, принято называть истоком. Область, расположенная под консольной балкой и используемая для создания электростатической силы, называется затвором. Область, с которой

происходит механический контакт консольной балки при ее отклонении от первоначального положения, за счет действия электростатической силы, называется областью стока.

На рис. 3.24 приведена структура интегрального микромеханического ключа.

Микромеханический ключ может работать в инверсном и нормальном режимах (рис.3.25) [64].

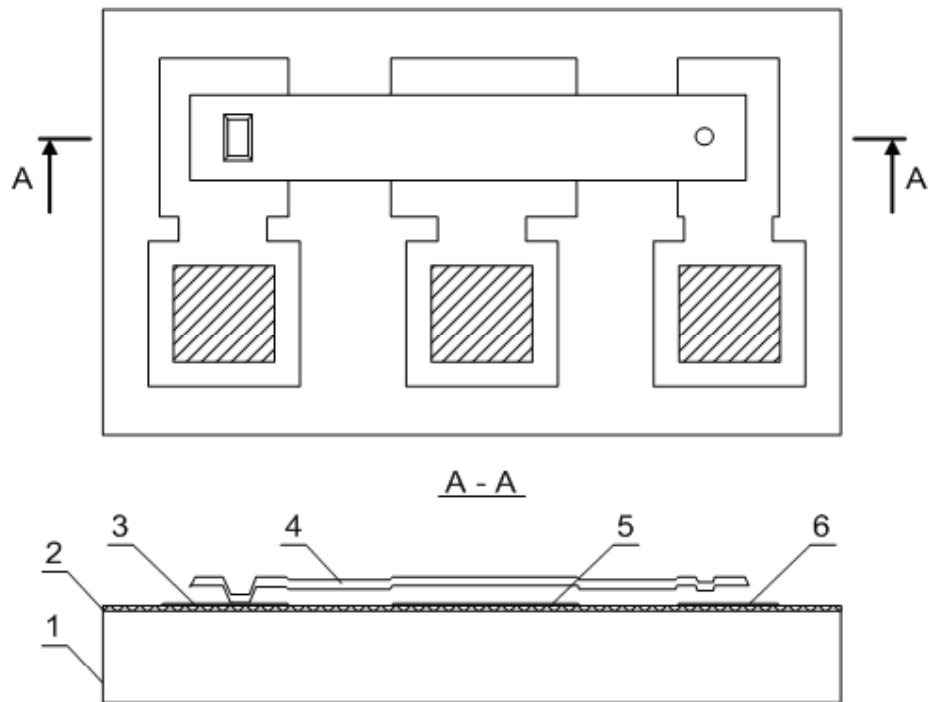


Рис. 3.24. Структура интегрального микромеханического ключа:

1 –подложка; 2 – диэлектрик; 3 –область истока;

4 – консольная балка; 5 – область затвора; 6 – область стока

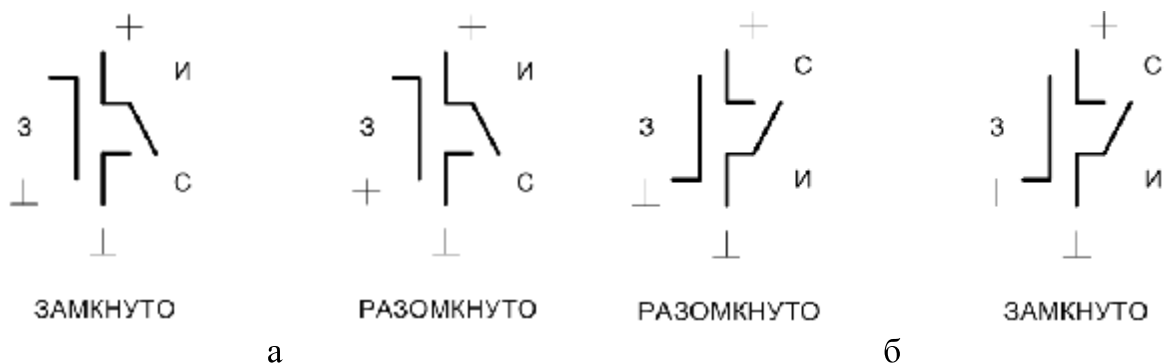


Рис. 3.25. Условные обозначения микромеханического ключа:

а – инверсный режим работы;

б – нормальный режим работы

При инверсном режиме работы область истока подключена к шине питания, а область стока — к шине нулевого потенциала. При отсутствии отклоняющего напряжения между областью затвора и консольной балкой, соединенной с областью истока, возникает электростатическая сила, которая притягивает консольную балку к затвору. Это приводит к возникновению электрического контакта между истоком и стоком. Интегральный микромеханический ключ замкнут. При подаче отклоняющего напряжения между затвором и консольной балкой, последняя возвращается в исходное положение. Микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии.

При нормальном режиме работы область стока подключена к шине питания, а область истока — к шине нулевого потенциала. В отсутствие отклоняющего напряжения между областью затвора и консольной балкой, последняя находится в исходном положении и электрический контакт исток-сток отсутствует. Интегральный микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии. При подаче отклоняющего напряжения на область затвора относительно консольной балки между ними возникает электростатическая сила.

На рис.3.26 показаны зависимости электростатической силы от величины зазора между консольной балкой и областью затвора при различных значениях отклоняющего напряжения (сплошная линия) и силы упругости от величины зазора (пунктирная линия) [4].

Когда приложенное напряжение достигает порогового значения включения, консольная балка притягивается к нижним электродам. Это приводит к возникновению электрического контакта между истоком и стоком. Микромеханический ключ находится в замкнутом состоянии. При уменьшении отклоняющего напряжения до некоторого порогового значения выключения консольная балка возвращается в первоначальное положение. Микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии [4].

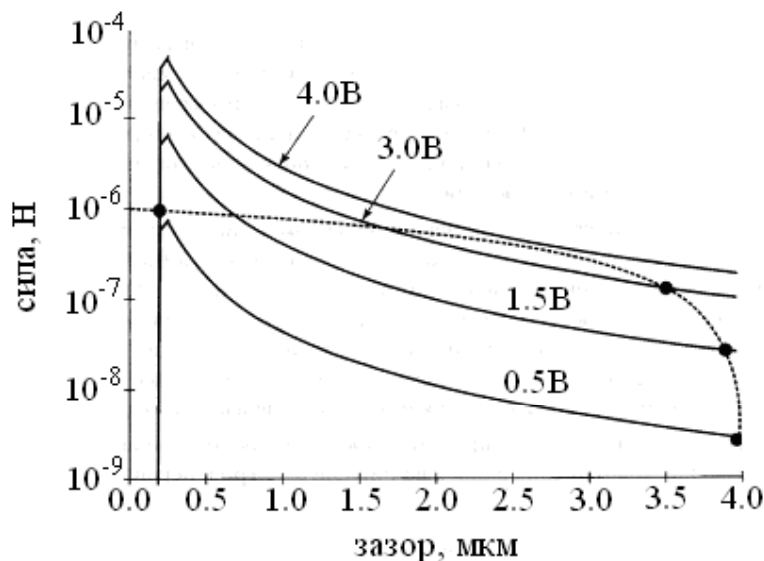


Рис.3.26. Зависимости электростатической силы и силы упругости от величины зазора (при толщине балки 0,5 мкм и площади области затвора $4 \cdot 10^4$ мкм²)

Микромеханические ключи с электростатической активацией обладают гистерезисом. Это связано с потерей стабильности механических структур, вызванное неконтролируемым электростатическим притяжением. Если конструкция микромеханического ключа позволяет балке переходить точку потери стабильности, то ключ замыкается и не размыкается до тех пор, пока отклоняющее напряжение не станет ниже порогового напряжения выключения, т.е. появляется гистерезис [4,63].

На рис.3.27 показан график изменения зазора в зависимости от отклоняющего напряжения [4].

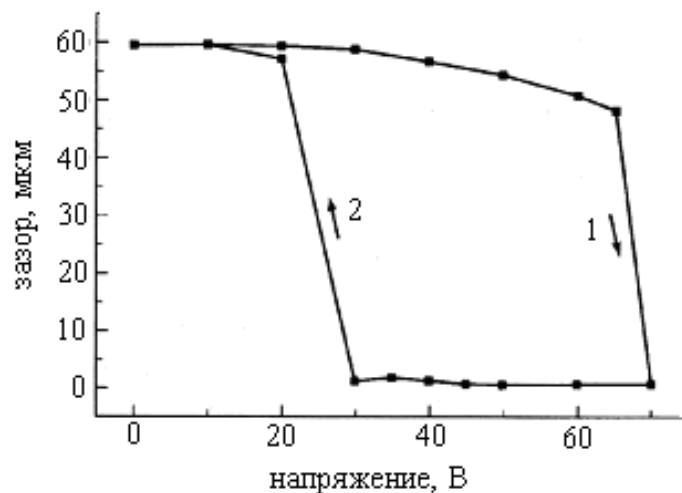


Рис.3.27. Зависимость изменения зазора от приложенного напряжения (при толщине балки 0,5 мкм и площади области затвора $4 \cdot 10^4$ мкм²):

- 1— переход из разомкнутого состояния в замкнутое;
- 2— переход из замкнутого состояния в разомкнутое;

Избавиться от гистерезиса можно только, если микромеханический ключ будет замыкаться, до того как консольная балка достигнет точки потери стабильности. При этом пороговые напряжения включения и выключения будут одинаковыми [4].

В отсутствии отклоняющего напряжения микромеханический ключ обладает высоким импедансом из-за воздушного зазора. Поскольку микромеханические ключи имеют емкостную природу, то для работы им не требуется непрерывная подача постоянного тока. Для переключения ключа в замкнутое или разомкнутое состояние необходима электростатическая энергия, равная $0,5 CU^2$. Таким образом, переключение микромеханического ключа определяется емкостью и прикладываемым напряжением [4].

При проектировании микромеханических ключей необходимо учитывать такой эффект как прилипание консольной балки к поверхности кристалла. В основе данного эффекта лежит действие микроскопических сил на поверхности контактов и, следовательно, этот эффект в сильной степени зависит от морфологии поверхности контактов. Проблема залипания подвижных частей особен-

но остро стоит для ключей с металлическими контактами [4].

3.3.1 Параметры микромеханических ключей

Основными элементами любой электрической цепи являются: источник электрической энергии, нагрузка или подключенные устройства и замкнутый контур для обеспечения протекания тока. Если любой из этих элементов отсутствует, тока в цепи не будет, и, следовательно, электрическая энергия от источника не дойдет до подключенных устройств. При разработке микромеханических ключей существенными являются следующие параметры [4]:

- длительность переходных процессов;
- время переключения;
- переходные процессы при коммутации;
- коммутируемая мощность сигнала;
- согласование входных/выходных цепей;
- ширина полосы пропускания;
- потери, вносимые микромеханическими ключами;
- развязка входа от выхода;
- последовательное сопротивление;
- напряжение срабатывания;
- срок службы;
- резонансная частота;
- согласование по амплитуде и фазе.

Длительность переходных процессов зависит от скорости изменения состояния ключа. Для операции включения она определяется как время нарастания выходного сигнала с 10% до 90% от его значения, а для операции выключения – как время спада выходного сигнала с уровня 90% до уровня 10%. Другими словами, длительность переходных процессов – это время, необходимое для изменения выходного напряжения на 1 дБ от состояния срабатывания. Для простого механического ключа это время определяется от момента отрыва подвижного контакта от одного стационарного контакта до момента его соприкосновения с другим стационарным контактом.

Время переключения также определяется скоростью переключения ключа из одного состояния в другое. Однако здесь при операции включения это время определяется от момента достижения управляющим напряжением уровня 50% до момента перехода выходным сигналом уровня 90%. Аналогично, при выключении ключа время измеряется до момента достижения сигналом 10% уровня от первоначального значения. Следовательно, время переключения характеризует реакцию ключа на изменение управляющего напряжения. К времени, требуемому для механического переключения, или времени переходных процессов могут прибавляться различные дополнительные составляющие, например, время задержки или нарастания управляющего сигнала. Механические ключи имеют меньшее быстродействие, чем электронные, их скорость переключения лежит в диапазоне от микросекунд до миллисекунд в зависимости от материала и конструкции.

Переходные процессы при коммутации ключа – это экспоненциально убывающие всплески напряжений во входных и/или выходных цепях ключа, вызванные изменением управляющего сигнала. Переходные процессы коммутации являются важной характеристикой работы ключей. В процессе переключения возникают и электромеханические, и электромагнитные переходные процессы. Электромеханические переходные процессы возникают из-за механического перемещения элементов ключа, а электромагнитные – из-за взаимодействия электрических и магнитных полей электрических компонентов системы.

Коммутируемая мощность сигнала – характеристика, показывающая, насколько эффективно ключ пропускает сигнал. Чаще всего передача мощности определяется точкой компрессии 1 дБ, что взято из усилительной техники. Предполагается, что мощность выходного и входного сигналов связана линейной зависимостью. Но на практике это условие выполняется только до какого-то уровня мощности, называемой максимальной. Точка компрессии 1 дБ определяется как максимальный уровень входной мощности, при котором выходная мощность становится на 1 дБ меньше, чем в линейной области.

Под согласованием входных/выходных цепей подразумевается согласование их импедансов, что часто является для ключей непростой задачей. Входные и выходные цепи ключа должны быть согласованы как во включенном, так и отключенном состояниях. Это необходимо для снижения влияния ключей на работу всей системы. Неправильное согласование иногда приводит к нежелательным переотражениям сигналов внутри цепи, которые могут стать причиной выхода системы из строя. Хотя на практике идеального согласования удастся достичь очень редко, все же необходимо стремиться удерживать переотражения сигналов в пределах допустимых уровней.

Ширина полосы пропускания является важной характеристикой ключей. Как правило, ключи не имеют нижнего предела частоты рабочего диапазона, а имеют только верхний предел. Для электромеханических ключей это объясняется потерями, обусловленными сопротивлениями и паразитными связями, ограничивающими их быстродействие.

Вносимые потери высокочастотных устройств показывают эффективность передачи сигналов. Для ключей вносимые потери определяются только для включенного состояния, когда происходит передача сигнала. Они выражаются через коэффициент передачи, измеряемый в дБ, между входными и выходными выводами переключающего устройства. На практике желательно, чтобы вносимые потери микромеханических ключей были минимальными.

Развязка входа от выхода определяется в момент отсутствия передачи сигнала. Ее мерой также является коэффициент между входными и выходными выводами переключателя в выключенном состоянии, т.е. когда нет передачи сигнала. Большое значение этого коэффициента, измеряемое в дБ, соответствует очень маленькой связи между входом и выходом переключающего устройства. Желательно, чтобы у ключей этот коэффициент был максимальным. В микросистемах значение этого коэффициента может уменьшиться из-за возникновения связи между механическими частями и линиями передач, что вызывает появление токов утечки.

Последовательное сопротивление. На практике ключ часто включается последовательно с линией передачи сигнала. Любое сопротивление, вносимое ключом во время передачи сигнала (во включенном состоянии), вызывает снижение уровня сигнала. На низких частотах такое влияние ключа можно выразить в виде последовательного сопротивления, играющего роль во время прохождения сигнала.

Напряжение срабатывания. Для всех ключей, работающих в автоматических системах, необходим сигнал управления, координирующий их состояние (вкл/выкл). Уровень напряжения таких сигналов для разных ключей может сильно различаться. В современных электромеханических ключах это напряжение желательно снизить до уровня, на котором работают остальные компоненты схемы.

Срок службы для механических переключающих устройств, в состав которых входят механические части, является достаточно важной характеристикой. Поломки таких частей, вызванные усталостью материала или неблагоприятными окружающими условиями, снижают срок службы всей системы.

Резонансная частота. Все движущиеся части механических ключей имеют свою собственную резонансную частоту, которую можно выразить через их массу и коэффициент упругости. На этих частотах потенциальная и кинетическая энергии входят в резонанс, что ограничивает максимальную скорость переключения, но никак не влияет на частоту передаваемых сигналов.

Согласование по фазе и амплитуде является важной характеристикой многоканальных ключей, поскольку она определяется конструкцией всего устройства и параметрами отдельных каналов: их длиной и потерями в них. Поэтому, как правило, для каждого канала определяются свои фазовые и амплитудные характеристики.

Несмотря на то, что многие из микромеханических ключей обладают отличными характеристиками – низкими вносимыми потерями и высоким коэффициентом развязки обычно вплоть до частоты нескольких сотен МГц, они имеют очень низкое быстродействие. Обычно время переключения таких ключей составляет 2-50 мс, и они рассчитаны только на несколько миллионов переключений. Это обусловлено тем, что электромеханические ключи осуществляют реальный разрыв и соединение линии передач внутри устройства. Максимальное быстродействие таких ключей (их скорость переключения) определяется механической резонансной частотой подвижных частей.

3.4. Интегральные микродвигатели

В настоящее время известны следующие типы интегральных микродвигателей [65-68]:

1. Электростатические воздушные планарные микродвигатели (ЭВПД).
2. Электростатические диэлектрические планарные микродвигатели (ЭДПД).
3. Пьезоэлектрические микродвигатели (ПД).

В электромеханике известны два способа передачи энергии от статора к

ротору – контактный и бесконтактный [65-68].

В случае контактного способа передачи энергии от статора к ротору либо используются специальные элементы (фрикционная вставка в элемент пьезоэлектрического двигателя, ферромагнитная лента между статором и ротором в индуктивных волновых двигателях и т.д.), либо статор и ротор контактируют между собой за счет волновой деформации пьезоэлектрической керамики. В таких двигателях при использовании точных датчиков положения ротора достигается исключительно высокая точность его позиционирования. Вместе с тем в этих двигателях серьезной проблемой становится механическое изнашивание контактирующих элементов статора и ротора [66].

В ЭВПД используется бесконтактный, а в ЭДПД и ПД – контактный способы передачи энергии. В первом случае ротор не касается поверхности статора, силовое сцепление ротора со статором осуществляется благодаря концентрации полей (электрического или магнитного) над зубцами ротора и статора. Преимущество обусловлено тем, что отсутствует изнашивание поверхностей ротора и статора [66,68].

Основной недостаток – невысокая точность позиционирования (в шаговых двигателях), определяемая размерами зубцов ротора и статора. Высокой точности позиционирования можно достичь только при чрезвычайно малых размерах этих зубцов и при очень высокой точности их изготовления. Такое решение значительно усложняет технологию изготовления двигателя, существенно увеличивает его стоимость [66].

3.4.1. Электростатические воздушные планарные микродвигатели

Основное отличие электростатических воздушных планарных микродвигателей от классических электростатических двигателей – малый зазор между статором и ротором, равный 1-2 мкм (в классических электростатических макромашинах он равен 1-2 мм). Малый зазор в межэлектродном пространстве определяет относительно высокую плотность "накачиваемой" в образец электрической энергии и, следовательно, эффективность двигателя. Разрабатываются ЭВПД вращательного движения и возвратно-поступательного движения. Ротор в первом случае расположен в подшипниках, во втором – скользит по направляющим. Можно обеспечить достаточно высокую надежность этих двигателей при указанных в литературе основных параметрах (для микродвигателя вращения с диаметром ротора 100 мкм): напряжение электропитания – 100 В; скорость вращения ротора – 50000 об/мин; мощность – 10⁻⁶ Вт. В ЭВПД трудно осуществить суммирование мощностей. Поэтому маловероятно, что они найдут применение в точной механике широкого назначения. В технологии этих микродвигателей используются дорогостоящие операции: изготовление размеров деталей с точностью не ниже 0,1 мкм; глубокое прецизионное химическое травление и т.д. [65,66].

Принцип работы планарных электростатических микродвигателей заключается в преобразовании электрической энергии в механическую, выраженную во вращательном движении ротора [65].

На рис. 3.28 представлен планарный электростатический микродвигатель с двенадцатью полюсами статора ($n_1 = 12$) и восьмью – ротора ($n_2 = 8$) [65].

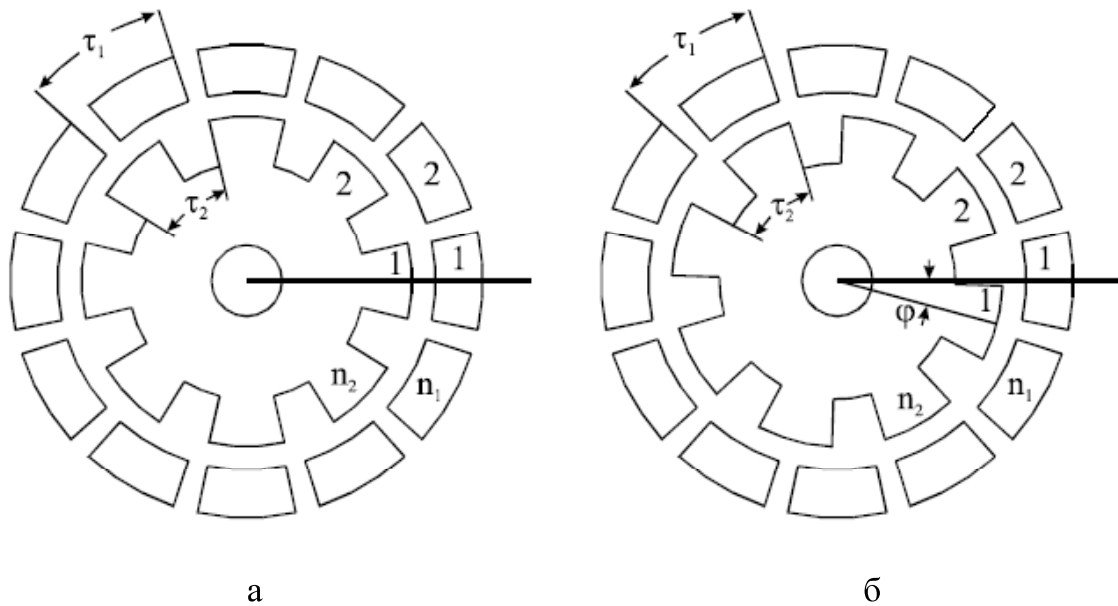


Рис. 3.28. Планарный электростатический двигатель:
а – начальное положение ротора микродвигателя;
б – перемещение ротора микродвигателя

Достоинствами данного вида электростатических микродвигателей являются простота конструкции и не столь строгие требования к структурному материалу микродвигателя.

В основном, в качестве структурного материала планарных микродвигателей, используются электропроводящие материалы.

Угловой шаг размещения полюсов статора и ротора определяется следующим выражением (см. рис. 3.28) [65]:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{2\pi}{n_1} \\ \tau_2 &= \frac{2\pi}{n_2} \end{aligned} \quad (3.14)$$

где τ_1, τ_2 – угловой шаг полюсов статора и ротора соответственно; n_1, n_2 – количество полюсов на статоре и роторе соответственно.

Рассмотрим работу планарного электростатического микродвигателя. Предположим, что напряжение приложено к полюсу статора 1 (см. рис. 3.28,а), т.е. микродвигатель находится в относительном равновесии. Если напряжение будет приложено к полюсу 2 статора, то положение ротора изменится так, что он займет новое положение относительно данного полюса, т.е. вращающий момент, действующий на ротор, повернет его на некоторый угол φ (см. рис. 3.28,б). Далее цикл повторяется.

На рис. 3.29 приведена последовательность переключения фаз [65].

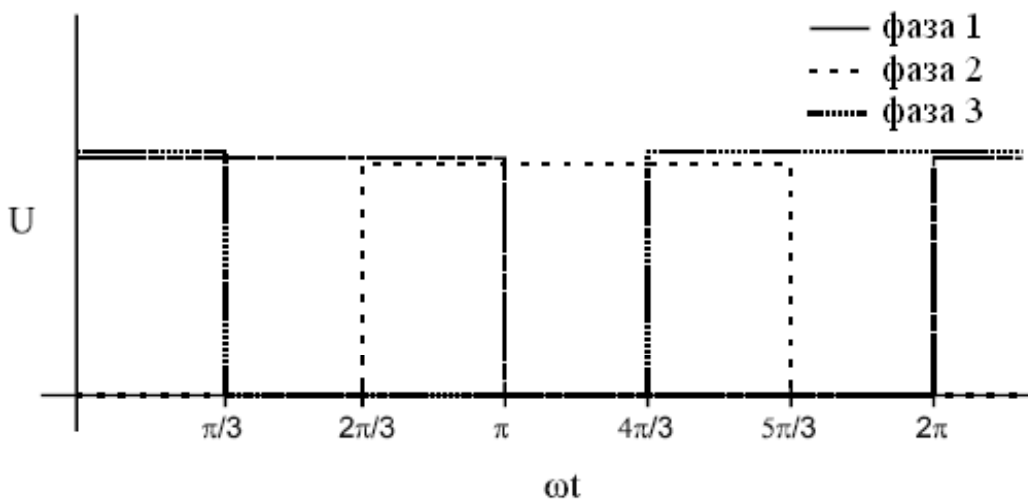


Рис. 3.29. Последовательное переключение фаз

Шаг приращения угла поворота ротора τ_s планарного микродвигателя может быть определен с помощью следующего выражения [65]:

$$\tau_s \min \left\{ \tau_1, \tau_2 \right\} \leq \tau \leq \min \left\{ \frac{1}{n_1}, \frac{1}{n_2} \right\} \quad (3.36)$$

Если количество полюсов статора будет меняться в диапазоне $j = 0, q - 1$, где q – количество фаз, то выражение (56) примет следующий вид:

$$\tau_s \min_{j=0, n_2-1, j=0, \dots, n_2-1} |j \tau_1 - i \tau_2| \geq 2\pi \min_{\substack{j=0, \dots, n_1-1 \\ n_1 \leq i \leq n_2-1}} |j \tau_1 - i \tau_2| \quad (3.37)$$

Угловая частота планарного электростатического микродвигателя может быть определена с помощью следующего выражения [65]:

$$n \frac{2\pi}{1\tau_s} \frac{1}{\omega_p} \quad (3.38)$$

где f – частота переключения фаз.

В табл.3.1 приведены значения углового шага размещения полюсов ротора τ_2 и шаг приращения угла поворота ротора τ_s в зависимости от количества полюсов ротора n_2 при $n_1 = 12$ ($\tau_1 = 30^\circ$) и $q = 3$ [65].

Значения τ_2 и τ_s в зависимости от n_2

n_2	4	6	8	11	13	16	18	20
τ_2	90°	60°	45°	32.7°	27.7°	22.5°	20°	18°
τ_s	30°	$\pm 30^\circ$	-15°	-2.7°	2.3°	7.5°	$\pm 10^\circ$	-6°

Вращающий момент, действующий на ротор, может быть описан следующим выражением:

$$M = \frac{W}{\varphi} \frac{1}{2} \frac{C U^2}{\tau_s}, \quad (3.39)$$

где C – изменение емкости между статором и ротором; U – напряжение между статором и ротором.

На рис.3.30 представлен планарный электростатический микродвигатель, изготовленный с использованием MUMPs-технологии [65].

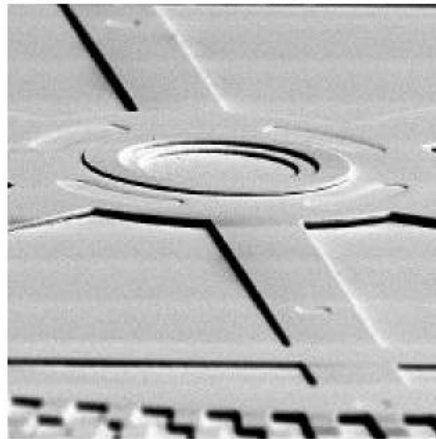


Рис.3.30. Планарный электростатический микродвигатель

3.4.2. Электростатические диэлектрические планарные микродвигатели

В электростатических диэлектрических планарных двигателях микродвижение создается при электростатическом накате металлизированной органической пленки на поверхность металла или диэлектрика (слои SiO_2 , Al_2O_3) в зависимости от того, куда обращен слой металлизации. Основным элементом ЭДПД является пленочная петля (диаметр – несколько миллиметров) из металлизированной пленки полиэтилентерефталата. Характерная особенность ЭДПД – накопление объемного заряда в диэлектрике при каждом акте электростатического наката. Этот заряд формируется на глубоких энергетических центрах (ловушках), характерных для широкозонных некристаллических диэлектриков и препятствует повторному накату металлической пленки. Уменьшение влияния объемного заряда возможно за счет использования импульсов напряжения с более сложной формой – наполнения их более короткими импульсами с разной

полярностью. Однако в этом случае значительно снижается энергетическая эффективность микродвигателя [66].

Схематически принцип работы такого микродвигателя иллюстрирует рис. 3.31 [66].

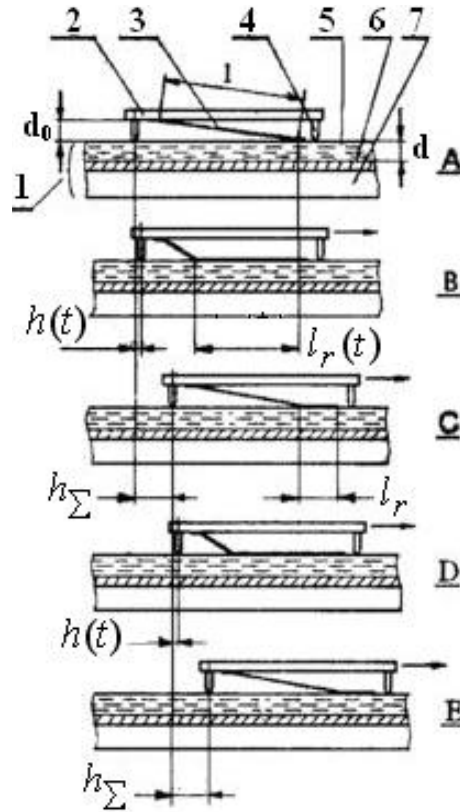


Рис. 3.31. Принцип работы планарного микродвигателя на основе тонких сегнетоэлектрических пленок:
1 – статор; 2 – ротор; 3 – лепесток; 4 – направляющие;
5 – диэлектрическая пленка; 6 – электрод; 7 – подложка

Неподвижная пластина (статор) 1 представляет собой кремниевую подложку 7, на поверхность которой последовательно нанесен электрод 6, а затем сегнетоэлектрическая пленка 5. Подвижная пластина (ротор) 2, разделенная от статора зазором d , с синтезированными на ее поверхности металлическими лепестками 3 длиной l перемещается относительно статора по направляющим (по опорам) 4. При подаче импульса напряжения между лепестком 3, находящимся в исходном состоянии (А), и электродом 6 происходит электростатический накат части поверхности лепестка на поверхность сегнетоэлектрика (состояние В). Перемещающаяся в пространстве металлическая пленка изгибается, происходит ее натяжение и она передает движение пластине 2, осуществляя таким образом электромеханическое преобразование энергии. Длина наката $l_r(t)$ возрастает во время действия импульса напряжения t_p , соответственно изменя-

ется во времени и шаг $h(t)$ перемещения ротора [66].

После прекращения действия импульса напряжения лепесток под действием упругих сил, возникающих при его изгибе, возвращается в исходное положение А (при одиночном импульсе напряжения) или переходит в новое положение С, характерное для непрерывного движения ротора (при подаче на образец серии импульсов); при этом ротор продвигается по инерции на расстояние h . От длительности этого процесса (процесса отлипания лепестка от поверхности сегнетоэлектрика) зависит минимальный интервал времени между соседними импульсами напряжения, т.е. максимальная частота следования f этих импульсов и соответственно мощность, развиваемая микродвигателем. При подаче на образец второго импульса напряжения движущаяся пластина с лепестками делает еще один шаг и переходит в состояние Е. После окончания импульса происходит пролет ротора по инерции в состояние D (и изменение конфигурации лепестков, аналогичное позиции С). При поступлении третьего импульса и далее движение происходит аналогично: от позиции В к позиции С с соответствующим перемещением пластины 2 [66].

Распластывание лепестка под действием электростатических сил начинается с момента касания поверхности лепестка и сегнетоэлектрика – процесса "захвата" лепестка, который определяет дальнейший характер "электронного приклеивания" лепестка к поверхности сегнетоэлектрика.

Процесс отлипания лепестка определяют силы, удерживающие концы лепестков у поверхности сегнетоэлектрика – адгезионные, гидродинамические, электростатические силы, связанные с остаточными электрическими зарядами в диэлектрике, точнее, с поверхностной неоднородностью распределения зарядов под площадью лепестка [66].

После прекращения действия импульса напряжения в распластанной части лепестков вблизи микронеровностей возникает противодействие упругих сил локально деформированных участков лепестков и трех указанных сил.

Как показывают исследования, роль адгезионных сил значительно меньше роли сил, связанных с остаточными электрическими зарядами. Площадь физического касания лепестков с диэлектриком много меньше видимой площади их касания, а адгезионные силы проявляют себя только при прямом контакте двух тел. Кроме того, не происходит абсолютно плотного касания двух поверхностей, воздушный зазор между ними составляет от 30 до 200 Å в зависимости от шероховатости поверхности диэлектрика [66].

3.4.3. Пьезоэлектрический микродвигатель

Принцип работы пьезоэлектрических микродвигателей основан на преобразовании колебаний пьезоэлектрического статора во вращательное движение полупроводникового ротора [68].

На рис.3.32 представлена структура пьезоэлектрического микродвигателя, состоящего из статора и ротора [68].

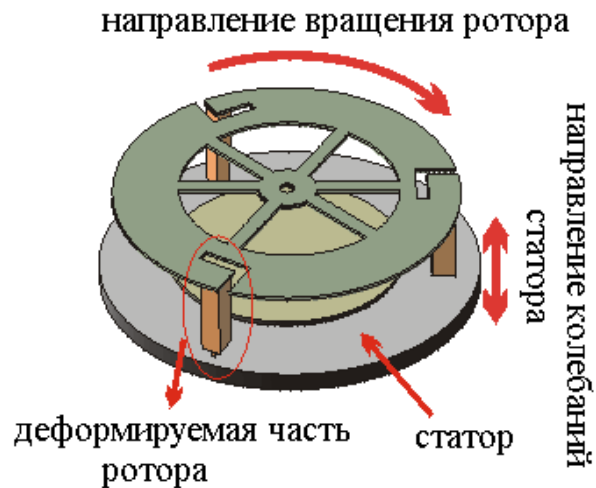


Рис.3.32. Пьезоэлектрический микродвигатель

Статор представляет собой мембрану, закрепленную на подложке с помощью упругого подвеса (рис.3.33). В центре мембраны расположен пьезоэлектрический слой ZnO. Диаметр статора – 2 мм.

На рис.3.34 представлен ротор пьезоэлектрического микродвигателя [68].

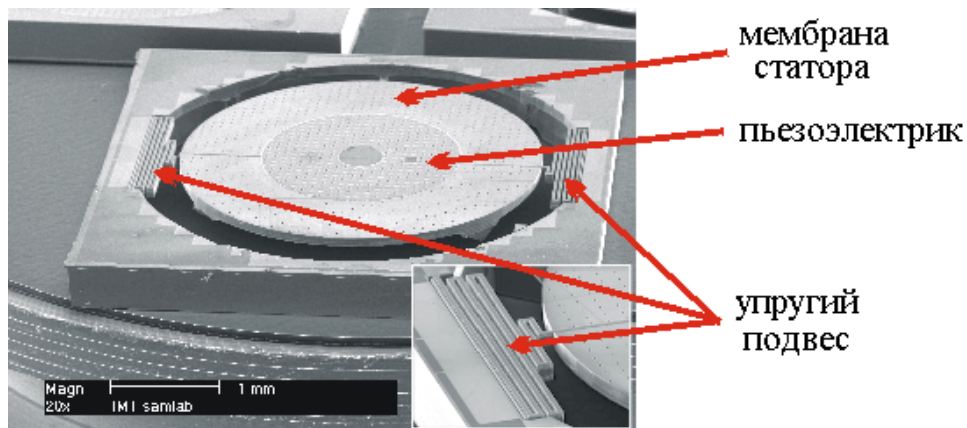
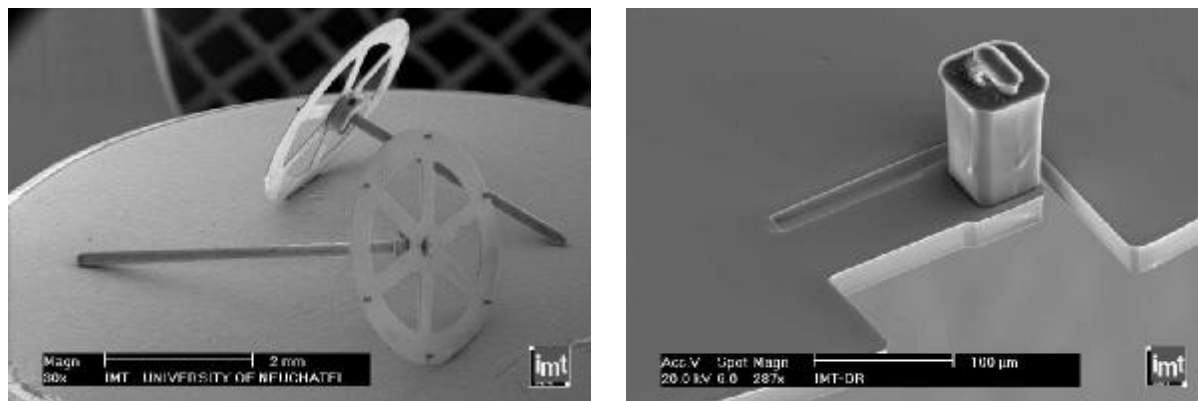


Рис.3.33. Статор пьезоэлектрического микродвигателя

Как видно на рис.3.34, размеры ротора составляют: длина – 5 мм, диаметр – 2 мм. Высота зубцов ротора – 100 мкм.

При отсутствии внешнего напряжения статор и ротор находятся в покое (рис.3.35,а). При подаче импульса напряжения на пьезоэлектрический актюатор статора происходит изменение его геометрических размеров, что в свою очередь приводит к деформации зубцов ротора (рис.3.35,б). Таким образом, ротор под действием сил упругости смещается на некоторое расстояние вокруг своей оси. Когда напряжение убирается, статор возвращается в первоначальное положение, а ротор оказывается смещенным на некоторое расстояние относительно своего первоначального положения. Далее цикл повторяется.



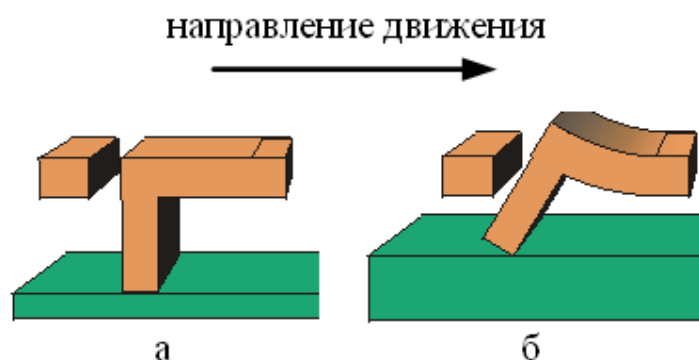
а

б

Рис.3.34. Ротор пьезоэлектрического микродвигателя:

а – внешний вид ротора;

б – зубец ротора



а

б

Рис.3.35. Принцип работы пьезоэлектрического микродвигателя:

а – до активации пьезоактюатора;

б – после активации пьезоактюатора

Данный вид микродвигателей изготавливается с использованием LIGA-технологии, позволяющей создавать роторы устройства с большим аспектным отношением. Основным недостатком данной конструкции микродвигателя является наличие операции микросборки в технологическом процессе изготовления, что не позволяет использовать групповые методы изготовления и снижает степень интеграции данных устройств.

4. ЛАБОРАТОРИИ-НА-КРИСТАЛЛЕ

Под термином «лаборатория-на-кристалле» понимается миниатюрное устройство, предназначенное для проведения различных химических и физических процессов со сверхмалыми объемами и количествами веществ неорганической и органической природы, находящихся в жидком или газообразном состоянии, с высокой степенью локализации воздействия [69-73].

Типичные размеры элементов лабораторий составляют от нескольких ми-

проводниковой пластины необходимо через эти же ямки организовать селективное сквозное травление вначале диэлектрической, а затем металлической пленки.

Предложенная структура обладает хорошей управляемостью конструктивными параметрами. Так, рабочий размер узкой части V-образного отверстия (ширина канала) определяется исходной толщиной пластины и размером окна в маске при проведении анизотропного травления. Величина зазора между электродами однозначно задается толщиной диэлектрической пленки. В необходимых пределах можно менять и толщину металлического электрода.

Исследование модели, описывающей реальную структуру насоса, подтверждает его работоспособность. Как отмечалось, силы, действующие на диполь, направлены в ту сторону, где изменение напряженности происходит быстрее. В рассматриваемой структуре изменение напряженности происходит как в верхней, так и в нижней части рабочей зоны, причем силы, действующие на диполь в этих частях, направлены в противоположные стороны. Но в силу асимметрии структуры эти силы не одинаковы, что подтверждается прямыми расчетами значений dE/dx на оси симметрии структуры, результаты которых приведены на рис. 3.18. Преобладание сил, действующих на диполи в нижней части рабочей области создают давление, приводящее к направленному перемещению жидкости.

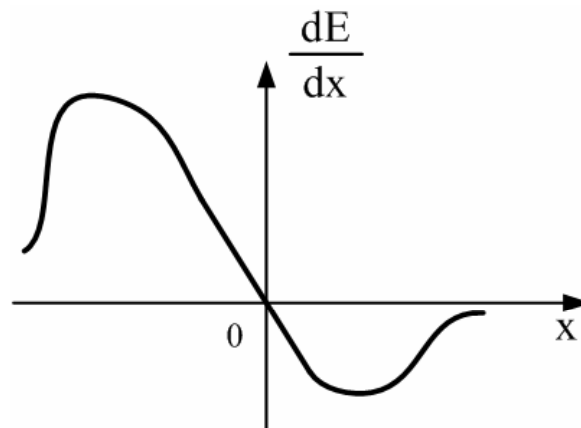


Рис. 3.18. Характер распределения сил в рабочей зоне микронасоса

4. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Как отмечалось во введении, электрическое поле в компонентах МСТ используется двояко: или для реализации актюаторов на основе сил, действующих в поле (рассмотрены в предыдущем разделе), или для получения информации о перемещении (изгибе, смещении) некоторых подвижных элементов. Информация получается за счет преобразования перемещений в изменение емкостей в некоторой системе электродов и измерения этих изменившихся емкостей. Такие преобразователи называют емкостными датчиками перемещений.

Если на начальном этапе развития МСТ для этих целей активно разрабатывались тензорезисторные преобразователи, то в последние годы более перспективными представляются емкостные датчики перемещений в связи с рядом их преимуществ, перечисленных ниже [16]:

1. В емкостных преобразователях с переменным зазором в электрический сигнал преобразуется прогиб упругого элемента, являющийся интегральным эффектом его деформации, в то время как тензорезистивные преобразователи воспринимают локальные деформации этого элемента.

2. Емкостные преобразователи меньше подвержены влиянию внешних факторов, поскольку диэлектрическая проницаемость воздушного зазора существенно стабильнее, чем удельная электропроводность полупроводниковых тензорезисторов.

3. Емкостные преобразователи обеспечивают больший динамический диапазон и лучшую помехоустойчивость, т.к. относительное изменение зазора при воздействии входной величины может достигать почти 100%, в то время, как предельные значения относительной деформации упругих элементов, как правило, не превышает 0,1%.

4. Интегральная технология позволяет реализовать воздушные зазоры в преобразователях в диапазоне 1-10 мкм, что соответствует удельной емкости 9-0,9 пФ/мм² и получить размер емкостных преобразователей, не превышающие габаритов тензопреобразователей.

Конструкции емкостных датчиков перемещений весьма разнообразны и тесно связаны с конструкцией и способом изготовления объекта, на котором они установлены. Из выражения для емкости плоского конденсатора, которое в СИ преобразуется в форму

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h},$$

следует, что вариацию емкости за счет перемещений конструктивных элементов можно получить как изменением площади обкладок S , так и зазора h между ними. Чаще всего используется изменение зазора. В этом случае для уменьшения ошибок измерения необходимо принять меры по сохранению постоянства эффективной площади обкладок при изменении зазора. Обычно это условие выполняется, если одна обкладка по площади заметно меньше другой (рис. 4.1,а) или используется вариант «пересечения» обкладок и рабочая площадь определяется только площадью пересекающихся частей (рис. 4.1,б). Постоянство рабочей площади обкладок способствует также повышению температурной стабильности датчика.

При проектировании емкостного датчика перемещений не следует забывать, что наличие между электродами разности потенциалов вызывает силы тяжения, стремящиеся изменить зазор. В пределе это может привести к залипанию электродов и отказу датчика.

Фрагменты конструкции емкостного чувствительного элемента акселерометра с обкладками, получаемыми металлизацией или диффузией, приведены на рис. 4.2.

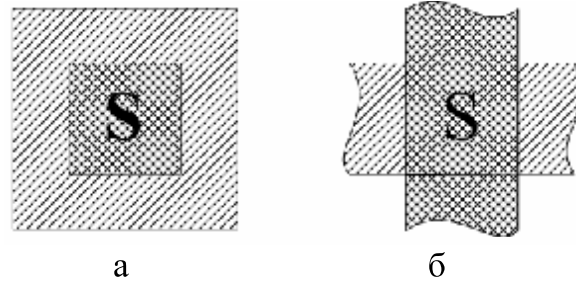


Рис. 4.1. Способы стабилизации рабочей площади обкладок:

а – полное перекрытие;

б – пересечение обкладок

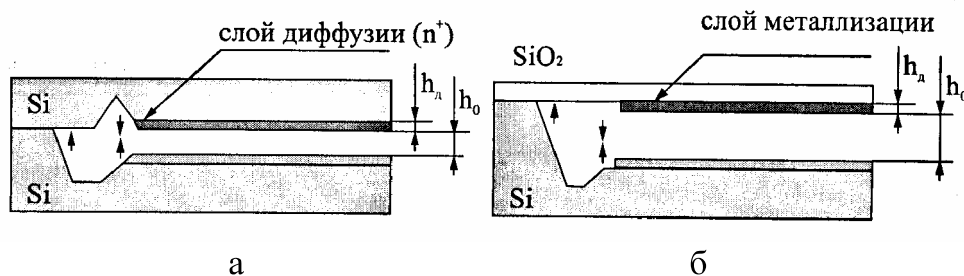


Рис. 4.2. Подвижный и неподвижный электроды:

а – электроды, изготовленные с помощью операции диффузии;

б – электроды, изготовленные с помощью операции металлизации

Для повышения чувствительности и стабильности емкостные датчики перемещений могут быть выполнены по дифференциальной схеме (рис. 4.3). В этом случае при взаимном перемещении электродов происходит одновременные изменения зазоров и емкостей в противоположных направлениях в соответствии с выражениями:

$$C_1 = \frac{e_0 S}{h_0 + \Delta h};$$

$$C_2 = \frac{e_0 S}{h_0 - \Delta h},$$

где h_0 – начальный зазор между электродами; Δh – смещение подвижных электродов относительно центрального.

Информация об измеренном перемещении должна преобразовываться в электрический сигнал по цепочке: перемещение \longrightarrow изменение емкости \longrightarrow изменение электрического сигнала. Естественно, что преобразование емкости в электрический сигнал возможно только на переменном токе или в импульсном режиме. Существует множество вариантов схем, реализующих такое преобра-

зование, причем полезную информацию может нести амплитуда или частота переменного тока, ширина и форма электрических импульсов и другие их параметры.

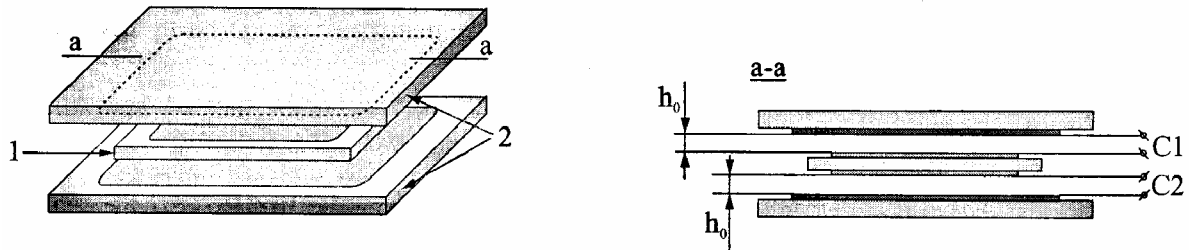


Рис. 4.3. Емкостной преобразователь перемещений:

1 – подвижный электрод; 2 – неподвижные электроды

В простейших случаях используются делители напряжения переменного тока, составленные из последовательно включенных элементов с постоянной (эталонной) емкостью C_0 и элемента с емкостью, несущей информацию о перемещении C_x (рис. 4.4).

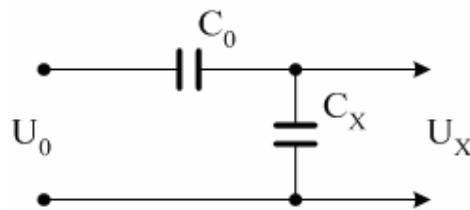


Рис. 4.4. Простейшая схема включения емкостного датчика перемещений

На этот делитель подается переменное напряжение постоянной амплитуды U_0 , напряжение на выходе делителя несет информацию об изменении емкости, которое связано с перемещением:

$$U_x = U_0 \frac{C_0}{C_0 + C_x}.$$

Для уменьшения погрешности, в первую очередь температурных, в датчиках, использующих опорный элемент (конденсатор), последний имеет ту же конструкцию и выполняется по той же технологии, что и несущий информацию о перемещении. Размещаются они так, чтобы оба элемента находились в одинаковых условиях. На рис. 4.5 представлен вариант такой пары конденсаторов, образующих чувствительный элемент датчика давления. Конденсаторы практически идентичны за исключением одной детали: опорный элемент, изображенный в нижней части рисунка, защищен от воздействия на мембрану измеряемого давления толстым слоем оксида кремния, в то время как мембрана верхнего элемента не защищена и прогибается под действием измеряемого давления и

емкость конденсатора C_x меняется.

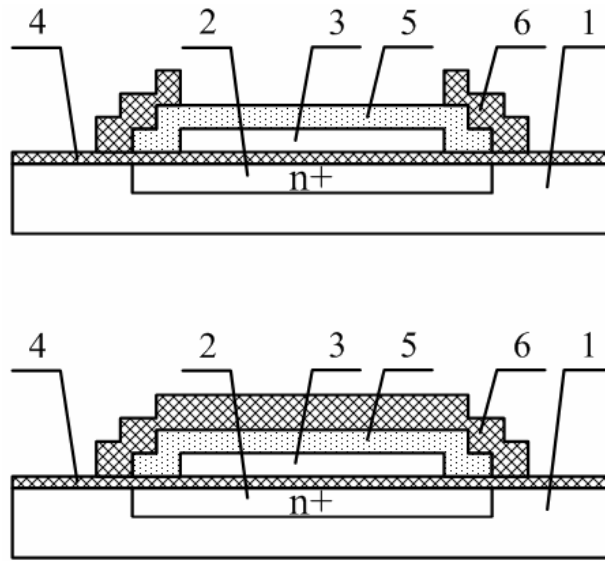


Рис. 4.5. Структура чувствительного элемента датчика:

- 1 – подложка n-типа; 2 – n+-электрод; 3 – полость;
4 – диэлектрик; 5 – мембрана; 6 – оксид кремния

Для повышения чувствительности преобразователя нередко используют мостовые схемы включения чувствительных элементов датчиков. В частности, для такого включения идеально подходит рассмотренный ранее дифференциальный чувствительный элемент (см. рис. 4.3). Детальная работа датчика рассмотрена в [6]. Принцип его работы можно понять с помощью рис. 4.6. Емкости C_1 и C_2 , включенные последовательно, составляют два плеча мостовой схемы, а роль двух других плеч играют двуполярные источники питания $\pm U_{on}$. Опорное напряжение подается на емкости через ключевую схему, которая на рис. 4.6 представлена условно, а практически реализуется на МОП-транзисторах, управление которыми осуществляется последовательностью импульсов в виде меандра. Таким образом, постоянное опорное напряжение преобразуется в последовательность импульсов, запитывающих мост то в одной, то в противоположной полярности.

При балансе моста ($\Delta h=0$; $\Delta C=0$) выходное напряжение равно нулю, а при наличии расбаланса

$$\Delta U = U_{on} \frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} = U_{on} \frac{\Delta h}{h}.$$

Это напряжение для дальнейшей обработки подается на схему измерений.

Наконец, в последнее время стали применяться более сложные компенсационные схемы измерения, в том числе и в датчиках перемещений. Работа та-

ких схем основана на следующих принципах. Чувствительный элемент (в нашем случае подвижный электрод емкостного датчика перемещений) находится под действием двух сил. Одна создается измеряемым внешним воздействием (например, давлением) и стремится вызвать перемещение рабочего электрода и изменение емкости в одну сторону. Другая сила создается самим измерительным устройством, например, это может быть сила электрического тяжения, действующая на тот же электрод в противоположном направлении. Величина этой силы изменяется («управляется») с помощью цепи обратной связи. Она охватывает измерительную цепь таким образом, чтобы суммарное воздействие обеих сил было скомпенсировано и рассогласование в их взаимодействии, которое улавливает чувствительный элемент, было бы минимальным. В результате точность работы, динамический диапазон измерений, линейность в системе существенно повышаются. Теория и практика проектирования таких систем является объектом автоматического регулирования. Для примера на рис. 4.7 приведена компенсационная схема измерения давления, использующая датчик перемещения [16].

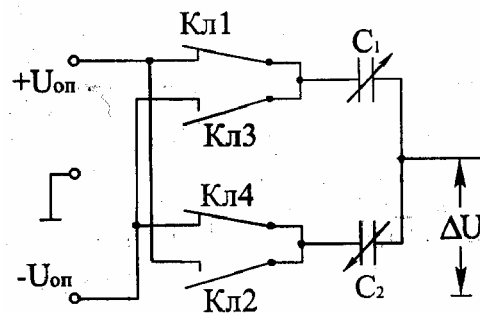


Рис. 4.6. Измерительная цепь акселерометра

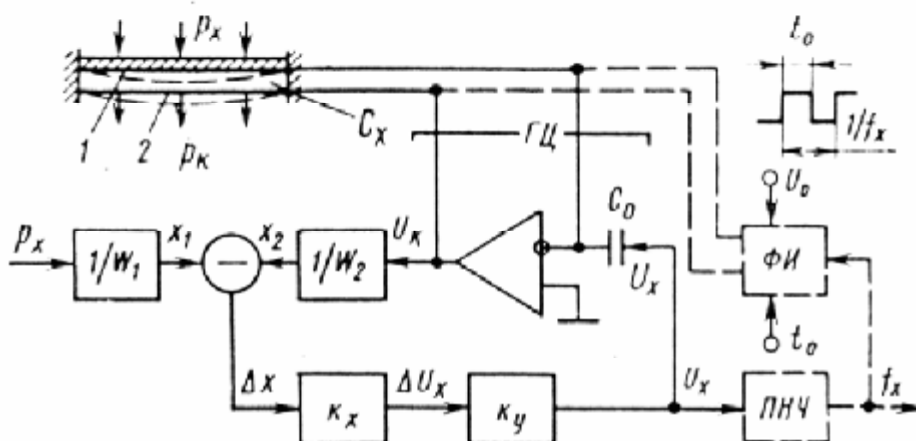
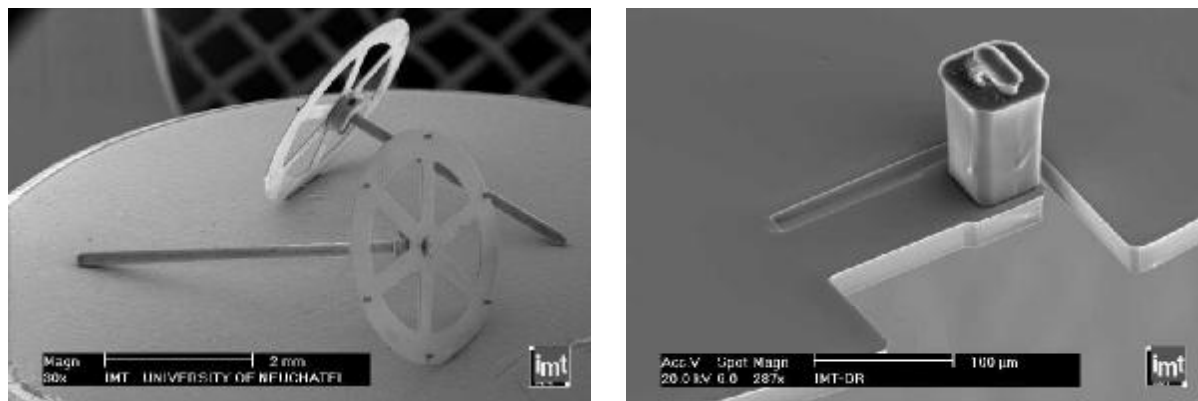


Рис. 4.7. Принципиальная электромеханическая схема с электростатическим уравниванием



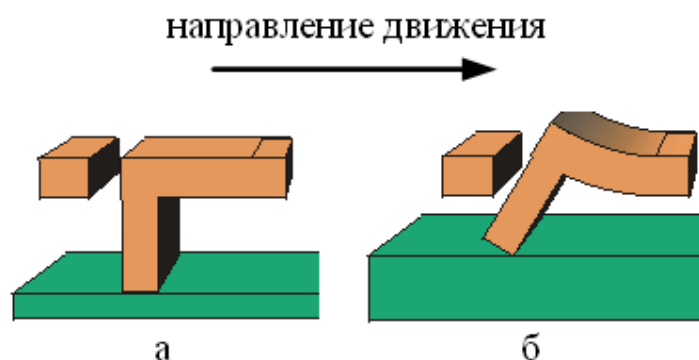
а

б

Рис.3.34. Ротор пьезоэлектрического микродвигателя:

а – внешний вид ротора;

б – зубец ротора



а

б

Рис.3.35. Принцип работы пьезоэлектрического микродвигателя:

а – до активации пьезоактюатора;

б – после активации пьезоактюатора

Данный вид микродвигателей изготавливается с использованием LIGA-технологии, позволяющей создавать роторы устройства с большим аспектным отношением. Основным недостатком данной конструкции микродвигателя является наличие операции микросборки в технологическом процессе изготовления, что не позволяет использовать групповые методы изготовления и снижает степень интеграции данных устройств.

4. ЛАБОРАТОРИИ-НА-КРИСТАЛЛЕ

Под термином «лаборатория-на-кристалле» понимается миниатюрное устройство, предназначенное для проведения различных химических и физических процессов со сверхмалыми объемами и количествами веществ неорганической и органической природы, находящихся в жидком или газообразном состоянии, с высокой степенью локализации воздействия [69-73].

Типичные размеры элементов лабораторий составляют от нескольких ми-

крометров до нескольких миллиметров, а типичная скорость перекачки жидкости — от нескольких микролитров до десятков миллилитров в минуту.

Основное применение данные микросистемы находят в медицине (химический анализ жидкостей, крови, ДНК; системы дозирования и ввода различных лекарственных препаратов) [70-72].

Лаборатории-на-кристалле по сравнению с традиционными системами анализа имеют следующие преимущества [70-72]:

- малое время отклика. Микролаборатория с высокой скоростью позволяет доставлять малые объемы анализируемого вещества в область реакции, изменять его физические и химические характеристики (нагревать/охлаждать, смешивать с другими веществами) и далее доставлять продукты реакции в область анализатора;

- низкие потери. Интегральное исполнение лабораторий позволяет снизить потери в потоках реагентов и продуктов реакции. Это является важной характеристикой этих устройств при работе с опасными или дорогими реагентами, а также при дозировке лекарственных препаратов;

- высокое значение отношения площади поверхности к объему жидкости. Данное свойство позволяет эффективно смешивать жидкие реагенты или обеспечивать большую площадь реакции с реагентом в твердом состоянии, а также улучшать теплопередачу для нагревания или охлаждения анализируемых веществ и обеспечивать возможность эффективного контроля температурного режима реакций.

Состав каждой лаборатории-на-кристалле определяется ее назначением.

При изготовлении лабораторий в основном нашли применения LIGA-технология, технология объемной микрообработки кремния, жидкостное химическое травление стекла и сухие пленочные фоторезисторы. Данные технологии позволяют снизить стоимость различных подсистем и изготавливать одноразовые подсистемы лабораторий, предназначенные для работы с образцами при диагностике опасных заболеваний (СПИД, гепатит и т.д.) [69-72].

Также важной особенностью при изготовлении лабораторий-на-кристалле является выбор подложки, которая должна удовлетворять следующим требованиям [70-73]:

- химическая инертность по отношению к анализируемым веществам, реагентам и продуктам реакции;

- возможность реализации в подложке канала с микронными размерами;

- высокие диэлектрические свойства.

Несмотря на преимущества лабораторий-на-кристалле перед традиционными системами анализа веществ, при проектировании данных микросистем также возникают некоторые проблемы. Уменьшение размеров подсистем лабораторий приводит к возникновению трудностей при моделировании как механических, так физических и химических процессов, происходящих в микросистеме.

4.1. Газовый хроматограф

В начале 80-х годов в Стэнфордском университете (США) был разработан первый прототип интегральной лаборатории-на-кристалле, названный газовым хроматографом [69].

Газовый хроматограф позволяет установить наличие тех или иных веществ в газовой пробе. Математическая обработка сигнала хроматографа позволяет определить не только факт наличия веществ, но и процентный состав анализируемой смеси.

Основная идея газовой хроматографии состоит в следующем. Смесь газов пропускают через транспортную систему, имеющую поверхность с известными характеристиками. Когда газовая проба вместе с газом-носителем движется через транспортную систему, взаимодействие молекул газа со стенками приводит к возрастанию отличий в подвижности между компонентами газовой смеси. Из-за различной подвижности разные компоненты смеси достигают конца системы за разное время, что позволяет идентифицировать составляющие фракции. Момент прихода того или иного компонента газа к концу колонки фиксируется терморезистором [69,73].

Блок-схема газового хроматографа показана на рис.4.1. Устройство размещено на кремниевой подложке и занимает площадь 4 мм² [69].

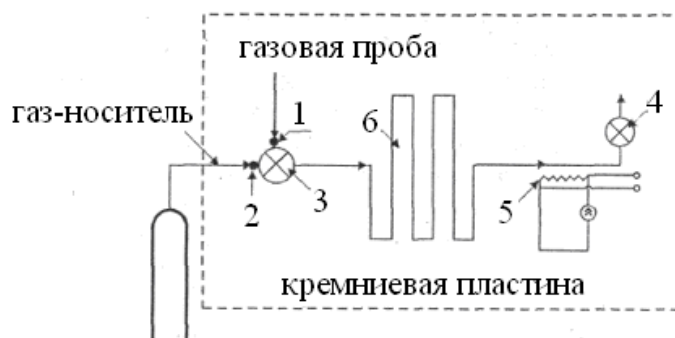


Рис.4.1. Структура газового хроматографа:

1 – вход вентилля газовой пробы; 2 – вход вентилля газа носителя; 3 – входной вентиль; 4 – выходной вентиль; 5 – терморезисторы; 6 – транспортная система

Все составляющие хроматографа выполнены с применением методов фотолитографии, химического травления и электростатического соединения.

Эффективность работы любого хроматографа пропорциональна отношению длины транспортной системы и коэффициента диффузии изучаемого компонента газовой смеси. Поэтому при конструировании хроматографов стремятся увеличить длину транспортной системы [69].

В рассматриваемом хроматографе транспортная система представляет собой капилляр в виде спиральной канавки шириной 200 мкм, глубиной 40 мкм и длиной 1,5 м, полученной изотропным травлением кремниевой подложки. После того как кремниевая подложка электростатически соединяется со стеклян-

ной пластиной, спиральная канавка превращается в капиллярную газовую разделительную систему, спиральные участки которой герметически изолированы благодаря прочному соединению кремния со стеклом [69].

Газ в колонку поступает через вентиль, выполненный в кремниевой подложке. Тело вентиля создается в три этапа. Сначала с помощью изотропного травления делают углубление, образующее цилиндр вентиля. Вторым изотропным травлением формируют углубление, где располагается диафрагма вентиля. На заключительном этапе с помощью анизотропного травления в пластине формируют маленькие отверстия входа и выхода вентиля. В качестве гибкой герметизирующей диафрагмы вентиля используют тонкий (5...15 мкм) никелевый диск, изгибаемый с помощью небольшого соленоида [69].

Поверхность герметизирующей диафрагмы и тело вентиля покрыты органической пленкой парилена, предохраняющей от утечек газа.

Терморезистор изготавливается методами микроэлектронной технологии на отдельной подложке кремния. На первом этапе исходная подложка окисляется с двух сторон, так что на обеих ее сторонах создается защитная маска из SiO_2 . На одной стороне с помощью фотолитографии формируется терморезистор толщиной 1000 \AA . На обратной стороне подложки вскрывают окно в защитном слое SiO_2 и с помощью технологии объемной микрообработки удаляют весь кремний до стоп-слоя из двуокиси кремния на передней стороне кремниевой подложки. Таким образом, терморезистор оказывается термически изолирован от кремниевой подложки. Газы, разделяемые в капиллярной системе, проходят над терморезистором, а затем выпускаются. Благодаря хорошей термической изоляции терморезистора от остальной конструкции хроматографа его сопротивление при заданном расходе протекающего газа зависит от теплопроводности окружающей газовой среды. Изменение теплопроводности приводит к изменению локальной температуры терморезистора и, следовательно, его сопротивления. Предварительная градуировка терморезистора позволяет по изменению его сопротивления установить наличие того или иного компонента газовой смеси. Этому способствует высокий температурный коэффициент сопротивления никеля – около $0,55 \% \text{ град}^{-1}$ [69].

Газовый хроматограф работает следующим образом. После полной продувки системы инертным газом-носителем, который поступает на вход 2 под избыточным давлением 0,2 атм., вентиль 3 открывается и через вход 1 в капиллярную систему поступает проба неизвестного газа под давлением несколько выше, чем 0,2 атм. После введения пробы объемом около 5 нанолитров вентиль снова закрывается и газ-носитель переносит пробу через транспортную систему 6. Поскольку вытравленный капилляр имеет наполнитель для газовой хроматографии, входящие в состав пробы компоненты разного молекулярного веса проходят через систему с разной скоростью и поэтому выходят из системы последовательно. Терморезистор 5 воспринимает колебания теплопроводности газового потока, и изменение его сопротивления приводит к изменению падения напряжения на нем. Типичный вид сигнала с газового хроматографа показан на рис. 4.2 [69].

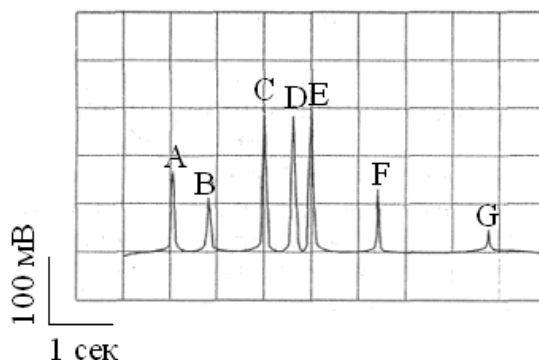


Рис.4.2. Выходной сигнал газового хроматографа:

A – азот; B – пентан; C – дихлорметан;
D – дихроформ; E – 111-трихлорэтан;
F – трихлорэтилен; G – толуол

В состав хроматографа входит несколько вентиля и вспомогательных газовых каналов, обеспечивающих предварительную подготовку прибора к работе, например, блок продувки, канал выброса неиспользованной пробы, автоматический измеритель интервалов времени.

В настоящее время имеются сообщения о разработке вариантов газового хроматографа, способного определить наличие в пробе газа восьми составляющих в течение трех минут с абсолютной погрешностью до 10^{-5} .

4.2. Жидкостный хроматограф

Жидкостный хроматограф включает в себя не только систему разделения, но и систему количественного измерения содержания каждого компонента, т.е. систему детектирования (вместе с системой обработки хроматографического сигнала) [73].

Для обеспечения анализа многокомпонентных смесей с высокой чувствительностью жидкостный хроматограф должен иметь в своем составе ряд блоков.

Схема жидкостного хроматографа приведена на рис. 4.3. В состав любого хроматографа входят пять обязательных составных частей: насос для подачи подвижной фазы через колонку (1), дозатор для введения пробы в колонку (2), разделительная колонка - сердце хроматографа (3), детектор – устройство для получения аналитического сигнала, пропорционального концентрации компонента (4), система обработки – преобразователь аналитического сигнала в форму, удобную для восприятия системой автоматического управления (5) [73].

В состав хроматографа для удобства работы и расширения его аналитических возможностей могут входить ряд дополнительных устройств [73].

1) Устройство подготовки подвижной фазы.

Функции – фильтрование и дегазация растворителей. Фильтрование – методом пропускания растворителя через фильтр 0,2-0,5 мкм перед заливкой его в емкость или методом установки на входе насоса фильтра с небольшим сопро-

тивлением. Дегазация – вакуумом или нагреванием, или пропусканием через растворитель инертного газа, например, гелия.

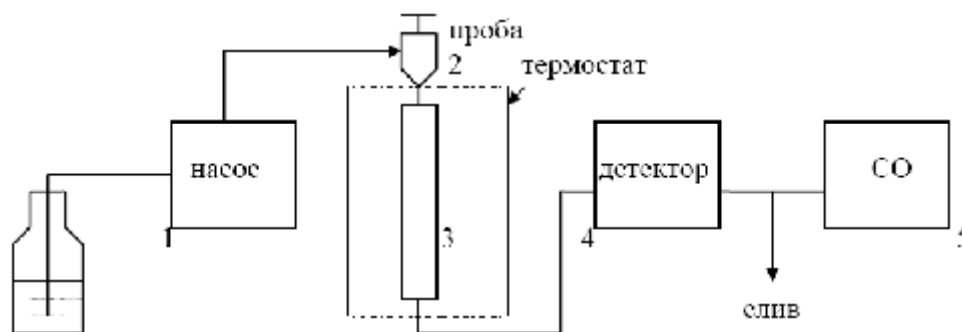


Рис.4.3. Структура жидкостного хроматографа

2) Термостат колонок.

Адсорбция в жидкостных и газовых хроматографах – процесс термодинамический, зависит от температуры. Следовательно, величина удерживания зависит от температуры. Кроме того, от температуры зависит вязкость растворителя, что определяет эффективность колонки. Таким образом, все три основные характеристики колонки: селективность, емкость и эффективность зависят от температуры. Для стабилизации условий разделения, чтобы получить воспроизводимые времена удерживания, амплитуды пиков и хорошее разделение, необходимо термостатирование колонок. Обычно температура термостата 30-50 °С, стабильность поддержания температуры – 0,3-0,5°С. Многие жидкостные хроматографы не имеют термостатов, так как колебания температуры в комнате не очень велики и воспроизводимость показаний приемлемая.

3) Послеколоночный реактор.

В ряде случаев трудно найти подходящий способ прямого детектирования выходящих из колонки компонентов (анализ аминокислот, определение тяжелых металлов и т.д.). В этом случае после колонки ставится реактор, где смешивается реагент и разделенные вещества (например, металлы). При этом получают интенсивно окрашенное соединение, которое можно детектировать на фотометре.

4) Автоматический дозатор (автосамплер).

Автоматический дозатор необходим в случае многократного повторения анализа больших серий однотипных образцов. При этом используется один расход растворителя, одна колонка. После окончания анализа (выхода последнего пика) производится автоматический ввод следующей пробы. Сами пробы предварительно заливаются в ампулы, которые устанавливаются на специальном столике. Специальный насос засасывает из ампулы пробу, прокачивает ее через пробоотборную петлю дозатора. При повороте дозатора петля промывается элюентом и проба попадает в колонку.

5) Градиентное устройство.

В ряде случаев при разделении сложных смесей необходимо в процессе

разделения изменять состав растворителя по определенному закону для ускорения анализа и улучшения разделения. Эту роль выполняет градиентное устройство.

Все основные узлы жидкостного хроматографа связаны между собой транспортными системами (насос – дозатор – детектор). Для этих целей обычно используются капилляры из нержавеющей стали внутренним диаметром 0,2-0,3 мм, наружным диаметром 1,0-1,6 мм. Эти капилляры могут выдерживать давление до 1000 атм., достаточно гибки и не поддаются коррозии. Однако в ионообменной и ионной хроматографии коррозионная стойкость нержавеющей стали мала, происходит реакция железа, марганца, никеля, кобальта с реагентами, что вносит существенные помехи при определении этих металлов в пробе. В этом случае капилляры выполняются из титан-циркониевых сплавов [73].

В последнее время за рубежом получили распространение капилляры из полиэтерэтеркетона, обладающих высокой коррозионной стойкостью и большой механической прочностью (держат давление до 300-400 кгс/см²). Однако их стоимость в 4-5 раза выше, чем у титановых капилляров. Применение фторопластовых капилляров себя не оправдало из-за их малой механической прочности [73].

Сорбенты, используемые в жидкостных хроматографах, характеризуются высокой скоростью массопередачи, что достигается, главным образом, уменьшением размера частиц сорбента. Это позволяет работать при высоких линейных скоростях потока подвижной фазы, что резко сокращает время анализа. Но при малых размерах частиц сорбента высокая скорость потока через колонку может быть реализована в случае, если растворитель подается в колонку под высоким давлением (до 150-250 атм.) [73].

Для обеспечения высокой скорости разделения колонки в данных устройствах имеют небольшой размер. Но чем меньше колонка, тем меньше, для исключения перегрузок, должен быть объем вводимой пробы (не более 1% от объема колонки). При этом уменьшается и объем растворителя, соответствующего хроматографическому пику. Для исключения расширения пика в детекторе объем детектора должен быть не более 10% от объема минимального пика (не более 10 мкл). Так как пробы вводится в дозатор очень мало, то детектор в хроматографе должен иметь высокую чувствительность [73].

В табл.4.1 представлены характеристики хроматографической колонки.

Таблица 4.1

Характеристики жидкостного хроматографа

Параметр	Значение
Размер частиц сорбента, мкм	5 – 7,5
Длина колонки, см	15 – 25
Внутренний диаметр, мм	4,6
Расход подвижной фазы, мл/мин	1 – 2
Линейная скорость подвижной фазы, см/мин	15
Рабочее давление на входе в колонку, атм	50 – 200
Продолжительность цикла разделения, мин	10

4.3. Детектирующие устройства микролабораторий

Детектор является преобразователем концентрации анализируемого вещества, растворенного в подвижной фазе, в электрический сигнал [69,73].

В первых хроматографах прошедшая через колонку подвижная фаза с компонентами пробы просто собиралась в небольшие сосуды, а затем методами титриметрии, колориметрии, полярографии и т.д. определялось содержание компонента в этой порции. Т.е. процессы разделения пробы и определения ее количественного состава были разделены во времени и пространстве. В современном хроматографе эти процессы объединены в одном приборе [73].

Для детектирования компонентов пробы может быть использовано любое физико-химическое свойство подвижной фазы (поглощение света, излучение света, электропроводность, показатель преломления и т.д.), которое изменяется при наличии в ней молекул разделяемых соединений. Из существующих 50 физико-химических методов детектирования в настоящее время активно используется 6 [73].

Наибольшей сложностью при конструировании хроматографических детекторов было сочетание малых объемов ячеек с высокой чувствительностью (ввиду малого объема и низкой концентрации пробы).

В табл.4.2. приведены характеристики существующих детекторов хроматографов [73].

Таблица 4.2

Характеристики детекторов хроматографов

Детектор	Измеряемое свойство	Чувствительность, мг	Селективность
Фильтровый фотометрический	Оптическая плотность на определенной длине волны, пропускаемой фильтром	10^{-10}	Высокая
Спектрофотометрический	Оптическая плотность на выбранной длине волны монохроматора	10^{-9}	Высокая
Рефрактометрический	Разность показателей преломления растворителя и раствора с пробой	10^{-6}	Низкая
Флуориметрический	Интенсивность излучения молекул пробы в элюенте	10^{-11}	Очень высокая
Амперометрический	Ток окисления или восстановления электрохимически активных соединений	$10^{-9} - 10^{-11}$	Очень высокая
Кондуктометрический	Электропроводность ионов пробы в элюенте (воде)	10^{-10}	Низкая

Чувствительность – это важнейшая характеристика детектора. Лучше всего оценивать этот параметр по физической величине. Если определять чувствительность через двойную амплитуду шума нулевой линии, шум выражать в физических единицах, то чувствительность фотометрического детектора будет выражаться в единицах оптической плотности, рефрактометрического – в единицах показателя преломления, вольтамперометрического – в амперах, кондуктометрического – в сименсах.

Чувствительность детектора может быть примерно одинаковой ко всем компонентам пробы, а может быть совершенно разной даже для близких соединений. В первом случае говорят о неселективном детектировании. Это значит, что измеряется физическое свойство, присущее и пробе и растворителю (показатель преломления, электропроводность). Во втором случае – селективное детектирование, что позволяет измерять физическое свойство, присущее только молекулам пробы, например, способность флуоресцировать или поглощать свет. Селективное детектирование, с одной стороны, позволяет повысить чувствительность определения или исключить те вещества, которые определять не нужно (предельные углеводороды при определении ароматики), с другой стороны, допускает возможность не обнаружить нужных нам компонентов (те же предельные углеводороды в нефти). Поэтому при исследовании общего состава объекта лучше использовать неселективный детектор типа рефрактометра, при определении концентрации отдельных компонентов в сложной смеси лучше использовать селективные детекторы [73].

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

5.1. Язык описания элементов микросистем VHDL-AMS

Расширение стандарта языка VHDL (VHDL-AMS – Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language Analog-Mixed Signals) предназначено для описания и моделирования как цифровых, так и аналоговых приборов, причем использующих не только электрические сигналы, но также оптические, химические, механические и др. Это является важным шагом на пути создания универсальных САПР, осуществляющих автоматическую компиляцию проектных решений на основе высокоуровневых текстовых описаний элементов ИС и компонентов МСТ.

Основной язык VHDL-1076-1993 разработан организацией IEEE для описания и моделирования цифровых быстродействующих электронных систем. Однако развитие микросистемной техники вызвало необходимость принятия IEEE нового стандарта – VHDL Std 1076.1-1999, который принято неформально называть VHDL-AMS [74,75].

Этот стандарт основного языка и расширений предназначен для описания и моделирования схем и систем [74,75]:

- консервативных и неконсервативных;
- непрерывных и непрерывно-дискретных;

- цифровых, аналоговых и цифроаналоговых;
- электрических и неэлектрических;
- во временном, частотном и операторном представлениях с учетом характеристик шума.

Перечисленные возможности важны при моделировании многих компонентов МСТ, представляющих собой смешанно-сигнальные электронные или смешанные электрические/неэлектрические системы.

Особенности языка VHDL-AMS Std 1076.1-1999 [74]:

1) расширенная структурная семантика языка предполагает: консервативность в моделях физических систем и допускает не консервативность для абстрактных моделей; совмещение цифровых и аналоговых портов, т.е. смешанно-сигнальных интерфейсов;

2) в моделирующее ядро добавлены: новая имитационная модель, поддерживающая непрерывное поведение на основе дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ); подсистема моделирования аналоговых схем; предусмотрена оптимальность решения систем ДАУ аналоговым моделирующим ядром;

3) язык поддерживает моделирование малосигнального режима в частотном представлении, статистическое моделирование, построение шумовых моделей и их имитацию;

4) по сравнению со стандартом языка VHDL введены новые положения в поведенческое описание схем и систем; новые интерфейсные объекты и новые типы объектов; цикл имитации поддерживает смешанный режим, а среда моделирования дополнена новыми атрибутами.

Язык VHDL-AMS поддерживает все типы данных, определенных в языке VHDL. Эти типы можно использовать в VHDL-AMS без каких-либо дополнительных ссылок [74,75]:

- `real` – действительные числа;
- `integer` – целые числа;
- `natural` – неотрицательные целые числа;
- `positiv` – положительные целые числа;
- `bit` – битовый тип {'0', '1'};
- `boolean` – логический тип данных {false, true};
- `vector` – массив типа `real`;
- `bit_vector` – массив типа `bit`;
- `time` – физический тип “время”.

Кроме того, для моделирования аналоговых систем в VHDL-AMS предусмотрены дополнительные типы данных, описывающих различные физические параметры (`domain`) [75]: `electrical_systems`; `mechanical_systems`; `fluidic_systems`; `radiant_systems`; `thermal_systems`; `chemical_systems`.

Дополнительные типы данных располагаются в отдельных пакетах.

В языке VHDL-AMS predefinedены следующие классы данных [74,75].

1. `Constant` – константы. Значение константы определяется при ее объявлении и не может быть изменено. Константы могут иметь любой из поддерживаемых типов данных, включая пользовательские.

2. Variable – переменные. Значение переменной изменяется столько раз, сколько встречается присваивание данной переменной. Переменные могут иметь любой из поддерживаемых типов данных.

3. Signal – сигналы. Сигналы представляют значения, передаваемые по проводам и определяемые присвоением сигналов (отличным от присвоения переменных).

4. Quantity – неизвестные. Значения неизвестным присваиваются в результате решения дифференциальных и алгебраических уравнений. Система моделирования аналоговой части схемы выполняет предварительно для всех зависящих от времени неизвестных в различных уравнениях дифференциальной части ДАУ начальное преобразование их в специфические величины времени, используя подходящие методы дискретизации.

Quantity могут иметь только скалярный тип с плавающей точкой.

Рассмотрим характеристики quantity. Характеристики составных quantity являются просто совокупностью характеристик своих скалярных субэлементов. Поведение каждого скалярного субэлемента не зависит от других.

Неизвестные могут быть объявлены там же, где может объявляться сигнал, за исключением пакетов. Quantity могут также быть объявлены как элементы интерфейса в списке портов. Интерфейсным элементом quantity называется порт quantity, аналогичный сигнальным портам. Интерфейсные quantity имеют режим, подобный режиму сигнала интерфейса (IN, OUT, INOUT).

Дополнительно предопределены следующие quantity:

- Q'dot – производная quantity Q по времени;
- Q'integ – интеграл от quantity Q по времени от нуля до текущего момента;
- Q'delayed(t) – значение quantity Q в прошедший момент времени, отстоящий от настоящего на фиксированный интервал (идеальная задержка $t = 0$);
- ANOW – представление текущего времени моделирования;
- Q'slew (max_rising_slope, max_falling_slope) – quantity Q, производная по времени которого (крутизна фронтов) ограничена сверху указанными значениями;

• Q'ltf(num,den) – функция интегрального преобразования по Лапласу от скалярного quantity Q как функции времени. Здесь num – константа типа REAL_VECTOR, являющаяся коэффициентом полинома числителя; den – константа типа REAL_VECTOR, являющаяся коэффициентом полинома знаменателя. Функция преобразования по Лапласу ставит в соответствие функции времени Q функцию частоты в виде отношения полиномов по степеням операторной переменной s. Во временной области это соответствует ДАУ с постоянными коэффициентами. В расширении языка функция преобразования по Лапласу определена как атрибут quantity, подобный атрибутам Q'Dot или Q'Integ;

• Q'zoh (T,initial_delay) – дискретный эквивалент quantity Q. Тип результата совпадает с типом Q. T – положительное значение вещественного типа, задающее период дискретизации; initial_delay – неотрицательное значение вещественного типа, задающее начальный момент дискретизации в секундах (по умолчанию устанавливается значение 0.0);

- S'ramp (tr,tf) – quantity, повторяющее сигнал S, но с заданными длительностями переднего и заднего фронтов;

- S'slew (max_rising_slope, max_falling_slope) – quantity, повторяющее сигнал S, но с производными по времени (крутизной фронтов), ограниченными сверху указанными значениями;

- Q'ztf (num, den, T, initial_delay) – функция интегрального Z-преобразования quantity Q как функции времени. Здесь num – константа типа REAL_VECTOR, являющаяся коэффициентом полинома числителя; den – константа типа REAL_VECTOR, являющаяся коэффициентом полинома знаменателя; T – положительная константа типа real, задающая период дискретизации; initial_delay – неотрицательная константа типа real, определяющая задержку начала дискретизации (по умолчанию устанавливается 0.0). Функция Z-преобразования ставит в соответствие функции времени Q с задержкой на константу T отношение двух полиномов от переменной 1/z. Подобно функции преобразования по Лапласу, функция Z-преобразования определена как атрибут quantity. Первый скалярный элемент массива знаменателя должен быть ненулевым. Тип числителя и знаменателя определен в пакете STANDARD как неограниченный массив с натуральным индексом.

5. Terminal (терминал) описывает переменные составных типов nature со скалярными элементами, для которых должны выполняться законы консервативности. Branch_quantity (неизвестная ветви) объявляется между двумя терминалами.

Каждый простой тип nature представляется как определенные физические параметры – electrical_systems, mechanical_systems и т.д.

Существует два типа branch_quantity:

- across quantity – воздействие, подобное, например, напряжению, температуре или давлению;

- through quantity – потоковое воздействие, подобное, например, току, потоку тепла или потоку жидкости.

Простой тип nature определяет свойство терминала быть представленным парой скалярных типов с плавающей точкой (рис.5.1). Например [75]:

```
SUBTYPE voltage IS real;
SUBTYPE current IS real;
NATURE electrical IS voltage ACROSS; current THROUGH;
TERMINAL plus, minus: electrical;
QUANTITY v ACROSS i1, i2 THROUGH plus TO minus;
```

(v – across-величина представляет разность напряжений на терминалах t1 и t2: $v = v_{t1} - v_{t2}$; i1, i2 – through-величины, представляют токи в двух параллельных ветвях, текущие от plus к minus).

Приведенное описание объявляет:

- два подтипа – подтип voltage (напряжение) и подтип current (ток);

- простой тип nature electrical;

- два терминала типа nature electrical и два quantity across и through между

двумя терминалами.

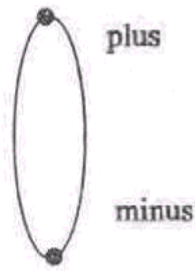


Рис.5.1. Тип nature electrical

Across quantity представляют разность потенциалов между двумя терминалами, а quantity through описывают различные параллельные ветви с током (токи текут от терминала plus к терминалу minus).

Тип branch_quantity явно не объявлен. Чаще всего он отражает nature ее терминалов. Он может быть составным типом. В примере quantity across v – тип напряжения, а тип quantity through i1 и i2 – ток. Как и в случае скалярного quantity, характеристики составного являются поименованным агрегатом характеристик его скалярных элементов. Терминалы должны иметь элементы того же простого типа nature и должны быть согласованы в других специфических особенностях. Терминалы quantity характеризуют терминал "плюс" и терминал "минус" и направление ветви от плюса к минусу (в электрической системе это направление положительного течения тока).

Терминал может быть объявлен там же, где допущено объявление сигналов. В конкретном случае терминал может быть элементом интерфейса в списке объявления портов. Тогда он называется терминальным портом:

PORT (TERMINAL anode, cathode: electrical);

Связывание терминальных портов используется для создания узлов в иерархических описаниях.

Объявление простого типа nature создает так называемый опорный терминал, который распространяется на все терминалы с элементами этой простой nature.

Опорный терминал T природы N определен как N'Reference. Само объявление T создает два quantity (рис.5.2) [74,75]:

- эталонная величина T'Reference является quantity across между плюсовым терминалом T природы N и минусовым терминалом N'Reference (т.е. потенциалом относительно "земли");

- суммарное quantity T'Contribution является quantity through, величина которой равняется сумме всех through quantity, приложенных к T (с соответствующим знаком). Если терминал T появляется как фактический, то суммарные branch_quantity соответствующей природы добавляются к сумме.

Как T'Reference, так и T'Contribution являются составными, если T составной. В этом случае правила относятся к каждому скалярному элементу T.

Величина каждого скаляра across quantity ограничена разницей опорных

(reference) quantity своих терминалов. Узел является комплектом скалярных терминалов, созданных деревом терминальных соединений. Все опорные quantity терминалов узла ограничены и равны между собой, а суммарное quantity терминала в корне дерева равно нулю.

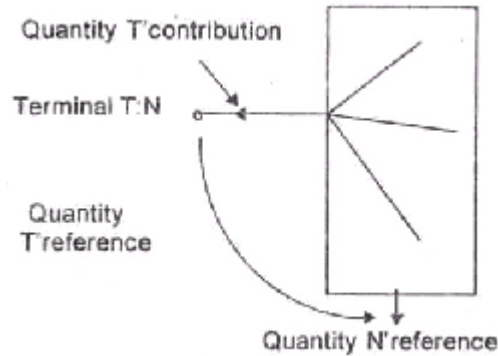


Рис.5.2. Опорный терминал

Из приведенного выше следует, что переменные класса quantity могут быть как «свободными» переменными, т.е. не связанными непосредственно с терминалами (портами и узлами) схемы, так и переменными состояния схемы (branch_quantity), т.е. в электрическом контексте – токами и напряжениями ветвей схемы. Для branch_quantity должны выполняться законы консервативности схемы (законы Кирхгофа).

В разделе операторов архитектурного тела VHDL-AMS описания могут присутствовать два типа параллельных операторов: simultaneous_statement и concurrent_statement [75].

Операторы simultaneous_statement появились лишь в последней версии языка и предназначены специально для описания аналоговой части модели.

Совокупность всех simultaneous_statement – это система алгебраических и дифференциальных уравнений, возможно с управляющими операторами. Неизвестными этой системы являются переменные класса quantity. Система должна быть совместной: число уравнений, решаемых в каждый момент времени моделирования, должно равняться числу неизвестных переменных класса quantity. Кроме уравнений, явно записываемых в разделе операторов архитектурного тела, существуют неявные уравнения, поддерживающие законы консервативности системы. Эти уравнения формируются автоматически при трансляции VHDL-AMS описания для переменных классов terminal.

В разделе операторов описания architecture_body допускается использовать следующие типы simultaneous_statement [75].

1. Операторы simple_simultaneous_statement – это простые уравнения, в правой и левой части которых записываются выражения. Операндами выражений могут быть переменные классов quantity или signal, константы, декларированные в архитектурном теле, или в области видимости архитектурного тела, а также функции и атрибуты переменных. Все операнды выражений, входящих в simple_simultaneous_statement, должны иметь базовый тип real или integer. Опе-

раторах в этих выражениях могут быть обычные арифметические операторы: +, -, *, /, **. Для изменения порядка выполнения действий в выражениях можно применять круглые скобки.

2. Операторы `simultaneous_if_statement` и `simultaneous_case_statement` применяются для модификации системы уравнений в зависимости от значений управляющих переменных в условиях. В качестве управляющих переменных могут использоваться как переменные класса `quantity`, так и `signal`. Это открывает возможность влияния цифровой части модели на ее аналоговую часть и наоборот.

`Concurrent_statement` предназначены для описания цифровой части модели. Они служат для формирования значений дискретных сигналов и для формирования иерархических описаний. Также операторы `concurrent_statement` являются средством взаимодействия аналоговой и цифровой частей модели [75].

К `concurrent_statement` относятся следующие операторы [75].

1. Оператор процесса (`process`) определяет независимый последовательный процесс, представляющий поведение некоторой части модели цифро-аналогового устройства. Выполнение оператора процесса состоит из повторяющегося выполнения последовательности операторов, записанных в нем.

2. Оператор `selected_signal_assignment` является одним из операторов, в котором аналоговые переменные оказывают влияние на цифровые сигналы. Основным способом изменения значения цифрового сигнала в зависимости от значения аналоговой переменной является использование атрибута `'ABOVE`. Значение атрибута `q'ABOVE(v)` переменной `q` класса `quantity` есть неявный сигнал типа `boolean`, который принимает значение `TRUE`, если $q > v$, и `FALSE`, если $q < v$, где v – постоянное значение.

3. Оператор `concurrent_break_statement` также является средством взаимодействия аналоговой и цифровой частей модели.

Язык VHDL-AMS поддерживает два стиля описания моделей компонентов микросистемной техники [75]:

1. Структурное моделирование (`structural modeling`) непрерывных систем производится с помощью переменных составных типов `nature`, причем каждый простой тип `nature` представляется как определенные физические параметры – `electrical_systems`, `mechanical_systems` и т.д. При структурном описании модель представляется в виде иерархии связанных компонентов, в которой каждый компонент представляет собой определенный физический параметр.

2. Поведенческое моделирование (`behavioral modeling`) непрерывных систем производится с помощью наборов ДАУ, описывающих взаимосвязь различных физических параметров. Поведенческое описание модели позволяет разработчику избежать операции декомпозиции модели по физическим параметрам и сосредоточить основное внимание на одной физической величине.

5.2. Проектирование элементов МСТ в САПР Tanner Pro

Система автоматизированного проектирования Tanner Pro предназначена для проектирования интегральных схем и компонентов микросистемной техни-

ки [76-79].

В состав САПР Tanner Pro входят следующие подсистемы [76-79]:

- MEMSLib – библиотека компонентов микросистемной техники;
- S-Edit – схемный редактор;
- L-Edit – топологический редактор;
- T-Spice – подсистема схемотехнического моделирования проектов.

5.2.1. Библиотека MEMSLib

Библиотека компонентов МСТ MEMSLib включает в себя описания технологий изготовления интегральной электроники и микросистемной техники, различные типы подвижных микромеханических элементов, электромеханических преобразователей и структурных свойств материалов и их схемотехнические модели. В данный пакет входят элементы микросистемной техники, созданные фирмами: MCNC-MUMPs, MOSIS-NIST, Analog Devices, CMP-Tima и т.д. [76].

В библиотеку MEMSLib также входит пакет макромоделей элементов МСТ, называемых макросами [76].

На рис.5.3 представлена схема взаимодействия библиотеки MEMSLib с подсистемами Tanner Pro.

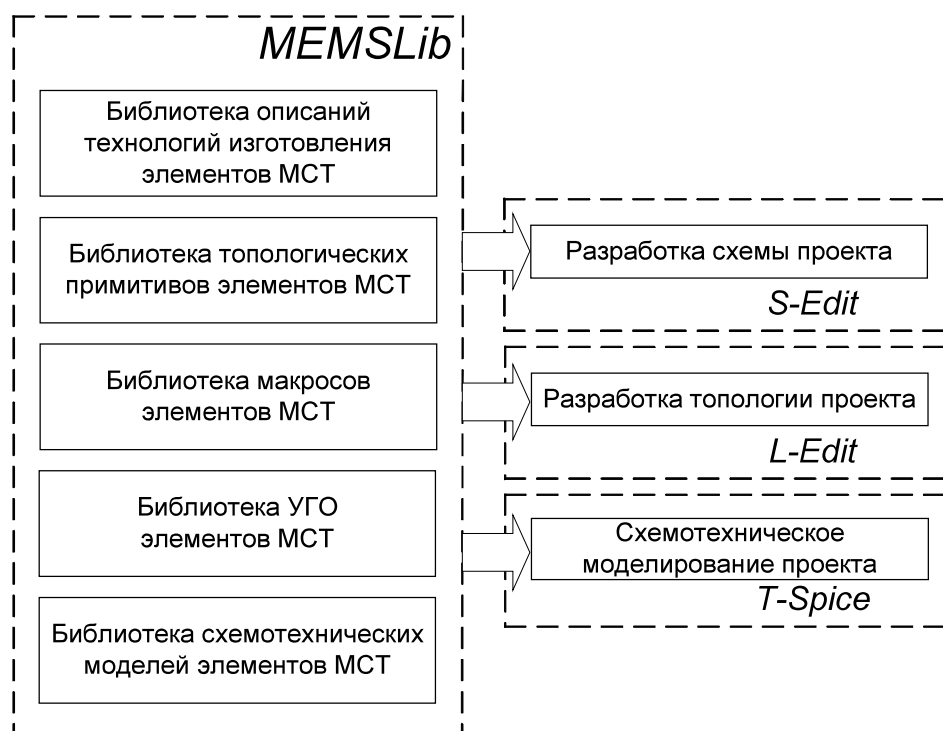


Рис.5.3. Взаимодействие MEMSLib с подсистемами Tanner Pro

Макросы элементов МСТ представляются в двух форматах: *.c и *.dll со встроенными функциями редактора топологии L-Edit и подсистемы схемотех-

нического моделирования T-Spice. Различие представления макросов в этих форматах заключается только в скорости загрузки и исполнения, поскольку файл в формате *.с должен быть вначале интерпретирован встроенным в САПР Tanner Pro интерпретатором языка С. В то время как макрос формата *.dll напрямую загружается в память [76,78,79].

На рис.5.4 представлено окно библиотеки макросов в редакторе L-Edit.

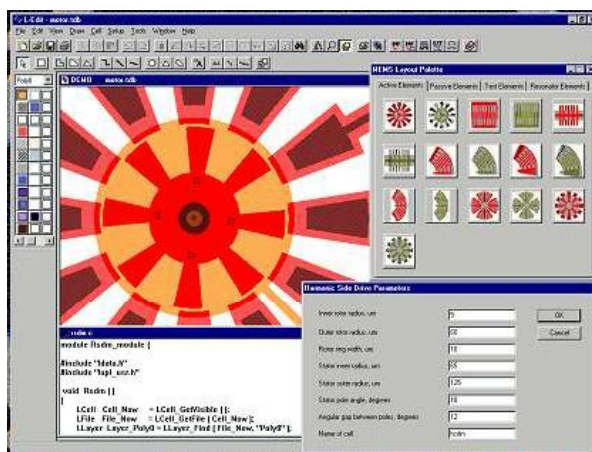


Рис.5.4. Окно библиотеки макросов

Для создания макроса в формате *.с необходим текстовый редактор, а для создания макроса в формате *.dll необходимо использовать компилятор C/C++.

5.2.2. Схемный редактор S-Edit

Схемный редактор S-Edit позволяет для каждого проекта сенсорного и актюаторного компонента МСТ или логического элемента ИС создавать иерархическую структуру, верхним уровнем которой является файл проекта. Файл проекта содержит модули, которые могут быть двух типов: примитивы и ссылки на другие модули [77].

Маршрут проектирования элементов МСТ в подсистеме S-Edit представлен на рис.5.5.

Каждый файл проекта редактора S-Edit содержит проектную и установочную информацию. В проектной части располагается непосредственное описание схемного решения, а в установочной – параметры среды разработки проекта [77].

Разработка схемного решения проекта может производиться в двух режимах: схемном и символьном. В символьном режиме разработчик создает только условное графическое отображение (УГО) компонента МСТ, а в схемном режиме – формирует межсоединения компонентов проекта [77].

Одним из важных атрибутов УГО компонента являются его порты и свойства. Порты необходимы для задания точек соединения компонентов проекта. Свойства определяют способ экспортирования компонента в файл списка связей. Свойства могут описывать физические (длина, ширина и др.), нефизиче-

ские параметры (тип прибора, комментарии и т.п.), а также формат вывода строки, описывающей компонент в экспортируемый файл списка связей [77].

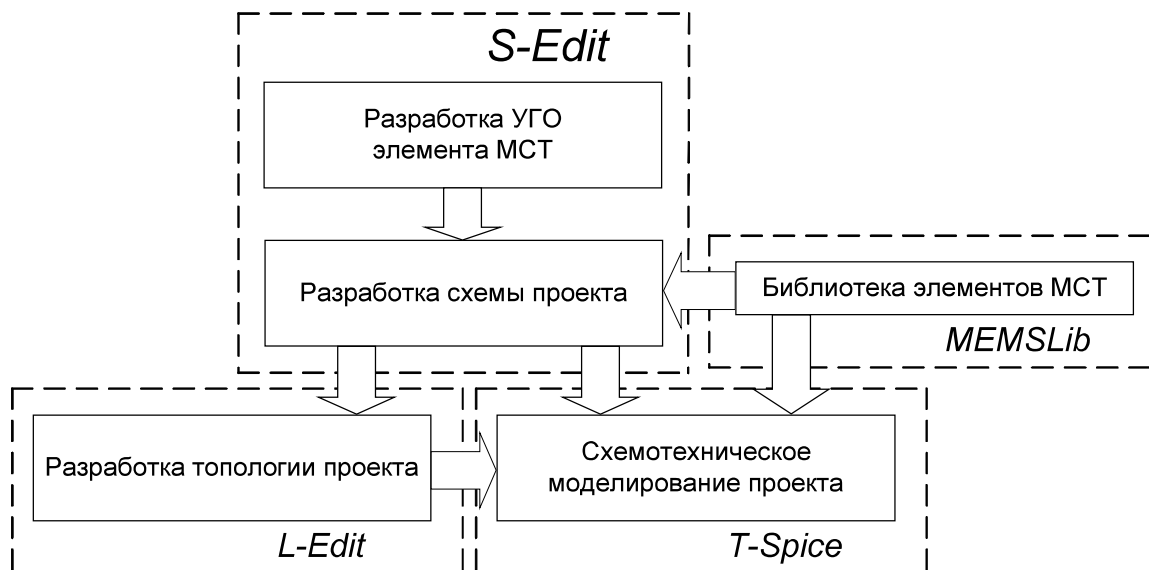


Рис.5.5. Маршрут проектирования элементов МСТ в САПР Tanner Pro с использованием редактора S-Edit

На рис.5.6 представлено рабочее окно редактора S-Edit с фрагментов схемы разрабатываемой микроэлектромеханической системы [77].

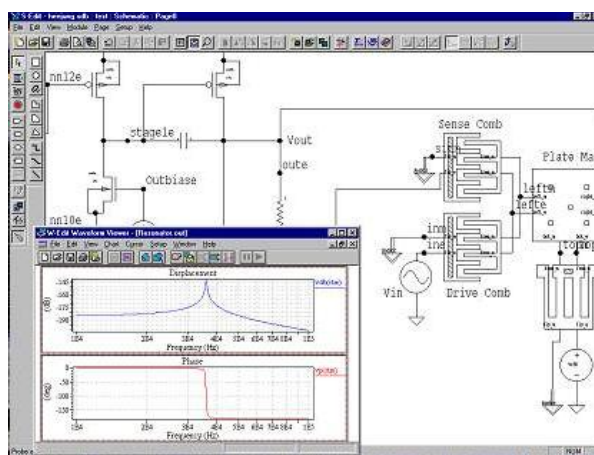


Рис.5.6. Рабочее окно схемного редактора S-Edit

Редактор S-Edit позволяет экспортировать схемы проекта в следующие форматы [77]:

- SPICE формат (*.sp) – файл данного типа предназначен для выполнения схемотехнического моделирования проекта программами семейства Spice, включающих в себя подсистему T-Spice САПР Tanner Pro;
- TPR File (*.tpr) – файл данного формата содержит список связей и предназначен для передачи и выполнения процедуры трассировки и размещения

проекта в подсистеме L-Edit САПР Tanner Pro;

- EDIF Netlist (*.edn) – файл данного формата содержит список связей и предназначен для передачи проекта программе NetTran САПР Tanner Pro;

- NetTran Macro File (*.mac) – файл данного формата предназначен для передачи проекта программе NetTran САПР Tanner Pro. В настоящее время данный тип файла экспорта используется только при работе подсистемы S-Edit с подсистемами САПР Tanner Pro более поздних версий;

- EDIF Schematic (*.eds) – файл данного типа содержит информацию о схеме проекта: список связей компонентов, иерархию проекта и свойства всех его компонентов. Данный тип файла экспорта позволяет передавать проекты, разработанные в подсистеме S-Edit САПР Tanner Pro, другим программам автоматизированного проектирования;

- VHDL File (*.vhd) – данный тип файла экспорта позволяет представить проект, разработанный в подсистеме S-Edit, в виде VHDL-описания.

5.2.3. Редактор топологии L-Edit

Редактор L-Edit позволяет быстро и удобно разрабатывать, редактировать и проверять на соответствие нормам выбранной технологии изготовления топологии элементов МСТ и интегральных схем. Данный редактор позволяет пользователю подключать из библиотеки MEMSLib или создавать самому технологические файлы, содержащие информацию о структурных и жертвенных слоях, их электрических свойств [78].

Маршрут проектирования элементов МСТ с использованием L-Edit в САПР Tanner Pro представлен на рис.5.7.

Разработчик может создавать иерархическую структуру проекта, верхним уровнем которой является топология проекта. Схема проекта, созданная в схемном редакторе S-Edit, может быть экспортирована в редактор L-Edit. Данная подсистема САПР Tanner Pro позволяет также производить синтез топологии на основе списка связей проекта в формате EDIF [78].

Для проведения схмотехнического моделирования проекта элемента МСТ редактор L-Edit позволяет экспортировать список связей проекта в подсистему T-Spice. Необходимым условием является наличие необходимых библиотек элементов МСТ в программе T-Spice [78,79].

Для проведения конечно-элементного моделирования элементов МСТ может быть использована внешняя программа численного моделирования напряженно-деформированного состояния ANSYS [76].

5.2.4. Подсистема схмотехнического моделирования T-Spice

Для определения функциональных и эксплуатационных характеристик проектных решений создаваемых элементов МСТ, САПР Tanner Pro обладает встроенной подсистемой схмотехнического моделирования T-Spice [79].

Исходными данными для данной подсистемы являются [79]:

- математические модели элементов МСТ;

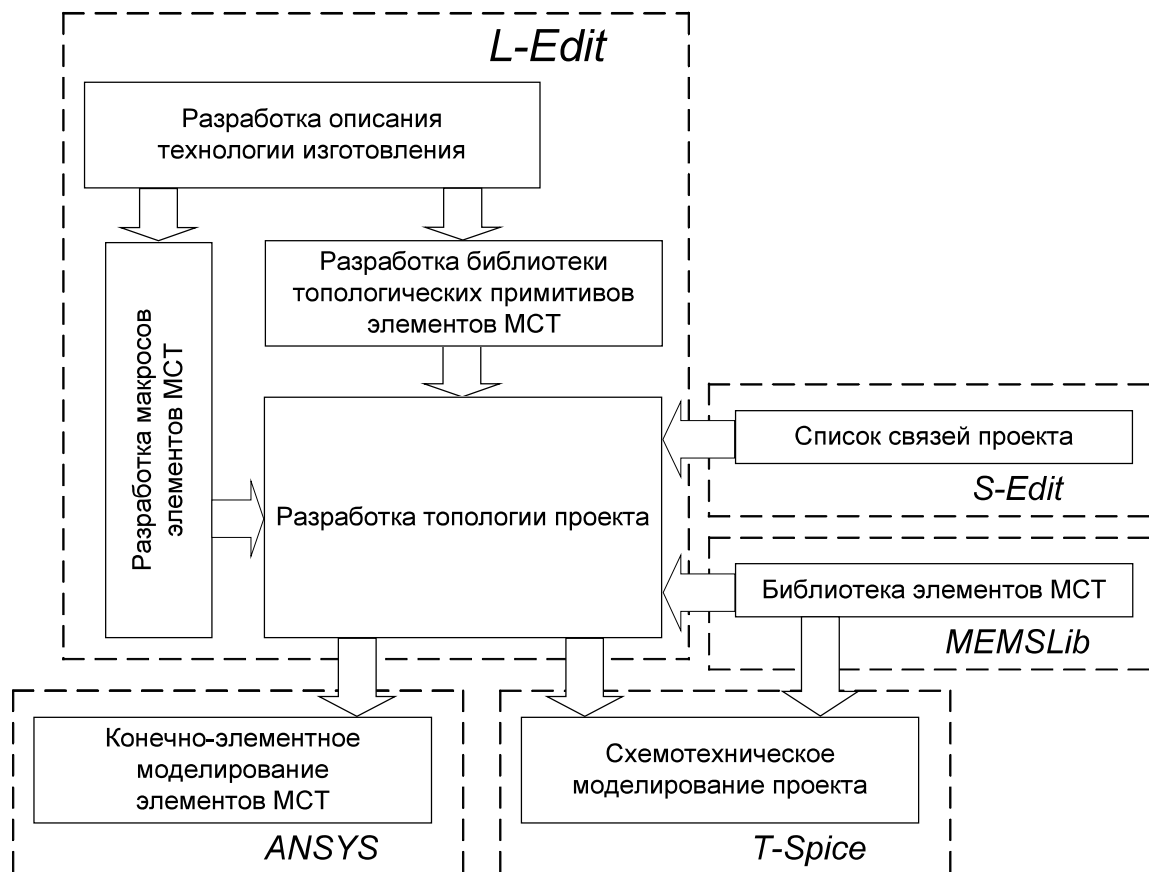


Рис.5.7. Маршрут проектирования элементов МСТ в САПР Tanner Pro с использованием редактора L-Edit

- параметры моделей элементов МСТ;
- схема соединений элементов МСТ.

Подсистема T-Spice обладает хорошим графическим интерфейсом, позволяющим быстро и удобно просматривать результаты моделирования и редактировать задания на моделирование элементов МСТ. Подсистема имеет ряд методов, с помощью которых достигается сходимость для проектов элементов, недоступных в других Spice-программах [79].

На рис.5.8 представлен маршрут проектирования микросистем в САПР Tanner Pro с использованием подсистемы T-Spice.

Библиотека математических моделей элементов в T-Spice, так же как и библиотека микрофрагментов в редакторе L-Edit, представляется в форматах *.c и *.dll. Подключение необходимых моделей осуществляется с помощью директивы .model. Директива .model имеет следующую структуру [79]:

.model <имя_модели> external <имя_параметра> = "<имя_файла>"

где <имя_модели> – имя модели элемента МСТ; <имя_файла> – имя файла, содержащего модель используемого элемента в формате *.c или *.dll; <имя_параметра> – параметр, зависящий от используемой операционной системы.

В случае, когда файл модели элемента МСТ представляется в исходном коде C (*.c), необходимо подключить библиотеки, содержащие функции языка

С и редактора L-Edit. Подключение библиотек осуществляется с использованием директивы .options [79]:

.options cpath=<путь>

где <путь> – путь к директории, содержащей библиотеки языка С и редактора L-Edit.

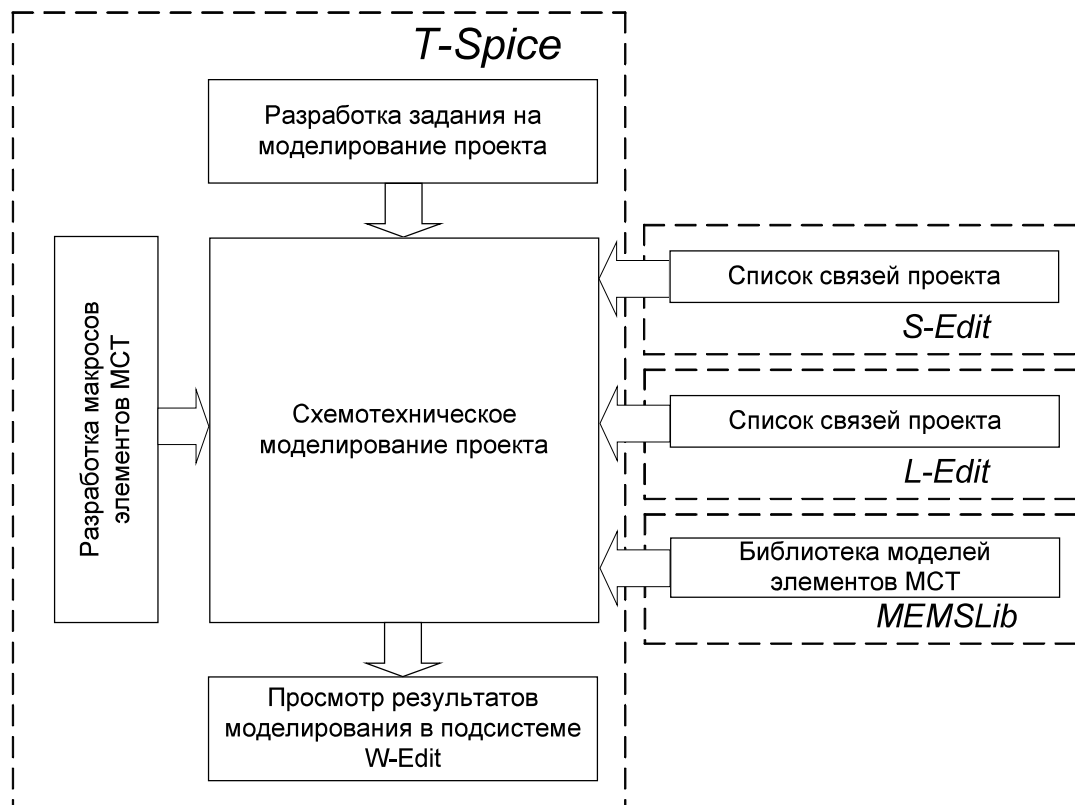


Рис.5.8. Маршрут проектирования элементов МСТ в САПР Tanner Pro с использованием подсистемы T-Spice

После проведения схематехнического моделирования осуществляется автоматический запуск программы просмотра временных диаграмм W-Edit Waveform Viewer. В рабочем окне программы W-Edit автоматически отображаются диаграммы сигналов, полученные в результате моделирования проекта. При выводе временных диаграмм по умолчанию все диаграммы выводятся сгруппированными в одном графическом окне (рис.5.9) [79].

5.3. Проектирование элементов МСТ в САПР CoventorWare

Система автоматизированного проектирования CoventorWare позволяет выполнять проектирование микроэлектромеханических систем двумя способами: снизу вверх и сверху вниз [80-83].

При проектировании сверху вниз вначале вырабатывается общая концепция будущего устройства и создается его структурная схема на основе поведенческих моделей подсистем, входящих в состав устройства. Затем производится

уточнение решения для реализации используемых подсистем, выполняется их оптимизация, после чего по их итогам проводится итерационный цикл уточнения параметров всей системы в целом. Далее выполняется электромагнитное и электромеханическое моделирование разработанной микроэлектромеханической системы, и проект микросистемы передается на производство для технологической проработки. В этом случае среднее время проектирования элементов микрооптикоэлектромеханических систем (МОЭМС) составляет около одной недели [80-83].

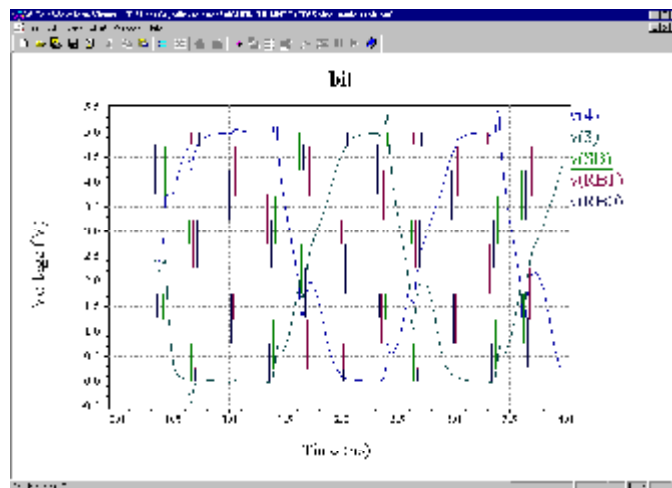


Рис.5.9. Рабочее окно программы W-Edit САПР Tanner Pro

Путь проектирования снизу вверх является более полным и позволяет создавать модели подсистем разрабатываемой микросистемы, не имеющих в библиотеках поведенческих моделей пакета CoventorWare. При данном способе проектирования, вначале задается спецификация устройства самого низшего уровня, производится прорисовка его топологии, электромагнитное и электромеханическое моделирование. Итерационный цикл оптимизации таких устройств может длиться от нескольких часов до нескольких дней. Далее оптимизированные устройства группируются в более сложные интегрированные микросистемы, которые также анализируются и оптимизируются. После чего, проект МОЭМС передается на производство. При таком подходе проектирования микросистем среднее время составляет около трех месяцев [80-83].

Пакет CoventorWare состоит из четырех основных программ, обеспечивающих разработчика всем необходимым инструментарием для проектирования микросистем: Architect, Designer, Analyser, System Builder [80-83].

5.3.1. Программа Architect

Программа Architect обеспечивает разработку проектов микроэлектромеханических и микрожидкостных устройств на основе поведенческих моделей, т.е. по пути проектирования сверху вниз [80,81].

На рис.5.10 представлен маршрут проектирования микросистем, исполь-

зуемый программой Architect в САПР CoventorWare.

Первый модуль программы Architect позволяет разрабатывать структурные и принципиальные схемы на основе поведенческих моделей электромеханических, оптических, сверхвысокочастотных и жидкостных устройств, а также типовых радиоэлементов [80,81].

Второй модуль выполняет моделирование созданных микросистем и цифровых схем управления с помощью Spice-подобных программ.



Рис.5.10. Маршрут проектирования микросистем, используемый программой Architect в САПР CoventorWare

Третий модуль программы Architect производит генерацию послойного описания топологии разработанной микросистемы с использованием полностью параметризованных топологических моделей, которое затем может быть передано в форматах GDSII, CIF в программу Designer, также входящую в состав пакета CoventorWare [80,81].

5.3.2. Программа *Designer*

Программа *Designer* предоставляет разработчикам все необходимые средства для двух- и трехмерного (2D, 3D) проектирования микроэлектромеханических систем. Она содержит три модуля [80,82]:

- редактор двумерных топологий;
- модуль создания трехмерной модели микросистемы на основе двумерной топологии;
- эмулятор технологического процесса.

На рис.5.11 представлен маршрут проектирования микросистем, используемый программой *Designer* в САПР CoventorWare.

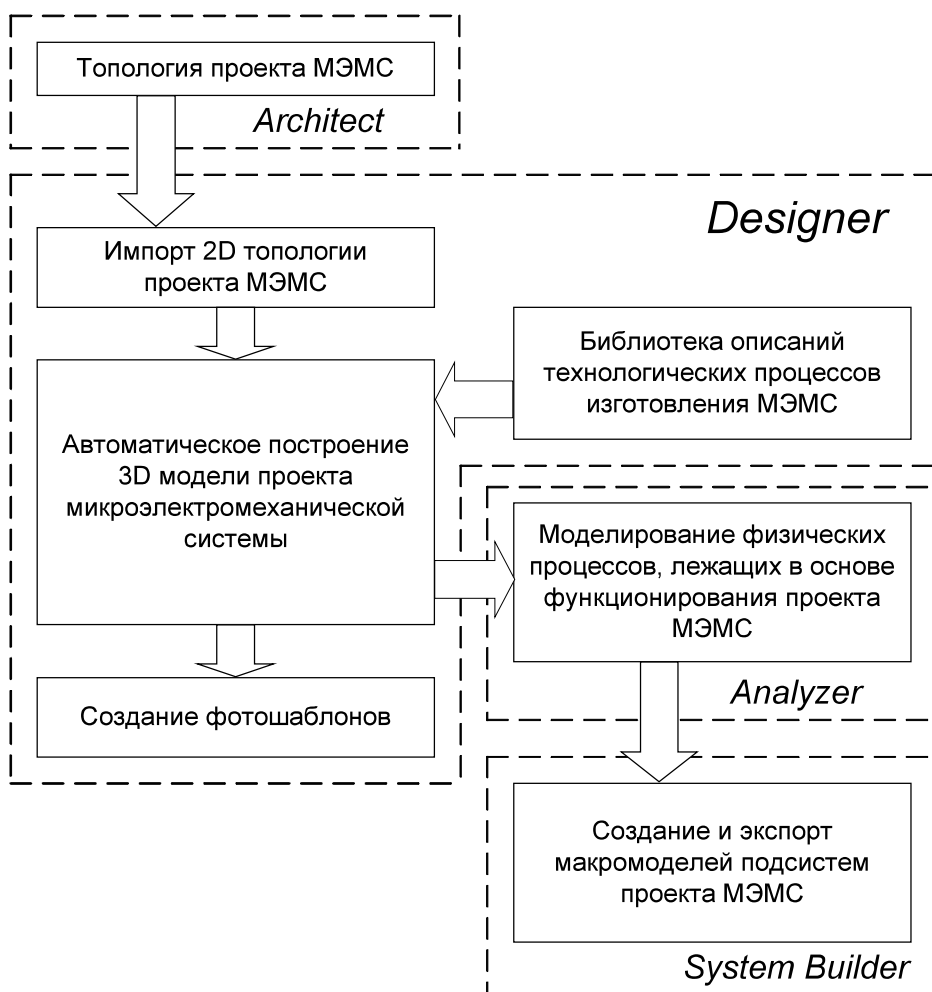


Рис.5.11. Маршрут проектирования микросистем, используемый программой *Designer* в САПР CoventorWare

5.3.3. Программа *System Builder*

Программа *System Builder* пакета CoventorWare представляет собой систему экстракции поведенческих моделей из микросистем, разработанных с по-

мощью программы Designer и промоделированных программой Analyzer и передачи их в соответствующую библиотеку программы Architect. Наличие этого модуля в пакете дает возможность эффективно использовать подсистемы микроэлектромеханических систем, спроектированных по принципу «снизу вверх» [80].

5.3.4. Программа Analyzer

Программа Analyzer является ключевым звеном пакета CoventorWare, так как дает возможность производить комплексное моделирование всех физических процессов, положенных в основу функционирования разрабатываемой микросистемы [80,83].

На рис.5.12 представлен маршрут проектирования микросистем, используемый программой Analyzer в САПР CoventorWare.

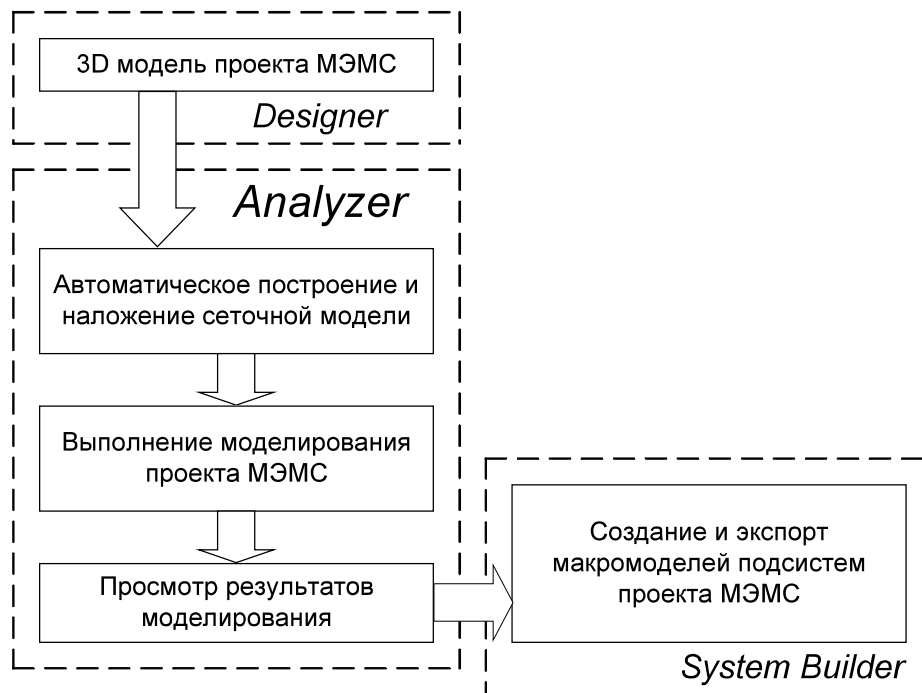


Рис.5.12. Маршрут проектирования микросистем, используемый программой Analyzer в САПР CoventorWare

Конфигурация этой программы чрезвычайно гибкая и позволяет использовать широкий набор вычислительных модулей, специализированных для решения конкретной задачи, например, моделирования оптических, тепловых, пьезорезистивных эффектов [80,83].

В табл.5.1 приведен полный список модулей программы Analyzer с указанием областей их возможных приложений [83].

Таблица 5.1

Модули программы Analyser и области их применения

Модуль	Описание	Оптические уст-ва	ВЧ МОЭМС	Биосенсоры	Микрожидкостные устройства	Сенсоры
MemCap	Анализ электростатических эффектов		*	*	*	*
MemOptics	Анализ дифракции плоских волн и гауссовых лучей	*				
Co-Solve EM	Анализ связанных электромеханических эффектов с гистерезисом		*			*
MemMech	Анализ структурных, модальных, гармонических и установившихся термомеханических параметров		*	*	*	*
MemTrans	Анализ термомеханических переходных процессов	*	*	*	*	*
MemETherm	Анализ тепловых деформаций в механических структурах	*	*		*	*
MemPZR	Расчет механических сопротивлений и равновесных потенциалов			*		*
MemHenry	Анализ частотно-зависимых сопротивлений и индуктивностей		*			
AutoSpring	Анализ упругих эффектов	*	*			*
MemPackage	Анализ эффектов, связанных с корпусированием МОЭМС	*	*	*	*	*
MemCFD	Анализ общих задач гидродинамики			*	*	
FSI	Полный трехмерный анализ жидкостных структур			*	*	
NetFlow	Анализ жидкостных потоков и эффектов переноса химических веществ в электроосмотическом, электрофоретическом и смешанных электрокинетических системах			*	*	
SwitchSim	Расчет электрокинетических характеристик жидкостных коммутаторов			*	*	

Продолжение табл.5.1

Модуль	Описание	Оптические уст-ва	ВЧ МОЭМС	Биосенсоры	Микрожидкостные устройства	Сенсоры
DropSim	Трехмерное моделирование процессов образования капель, их перемещения и столкновения	*		*	*	
ReactSim	Полное трехмерное моделирование структур, включающих различные эффекты: потоки жидкости, передачу тепла, диффузию, электрокинетическое взаимодействие			*	*	
BubbleSim	Трехмерное моделирование процессов перемещения пузырьков газов в жидкостях и микроканалах	*		*	*	

5.4. Программа конечно-элементного моделирования ANSYS

Программный комплекс ANSYS представляет собой многоцелевой пакет для решения сложных проблем физики и механики. Многоцелевая направленность программы (т.е. возможность оценки воздействий различной физической природы на исследуемое состояние конструкции, например, на ее прочность) позволяет использовать одну и ту же модель для решения таких связанных задач, как прочность при тепловом нагружении, влияние магнитных полей на прочность конструкции, тепломассоперенос в электромагнитном поле и др. [84,85].

Программа располагает широким перечнем расчетных средств, которые могут учесть разнообразные конструктивные нелинейности; дают возможность решить самый общий случай контактной задачи для поверхностей; допускают наличие больших (конечных) деформаций и углов поворота; позволяют выполнить интерактивную оптимизацию и анализ влияния электромагнитных полей, получить решение задач гидроаэродинамики и многое другое – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки и обширными возможностями создания макрокоманд с помощью языка параметрического программирования (APDL) [84,85].

Средства твердотельного моделирования включают в себя представление геометрии конструкции, основанное на использовании сплайн-технологии, геометрических примитивов и операций булевой алгебры [84].

Многоцелевые функции комплекса ANSYS обеспечиваются наличием в нем многочисленного семейства отдельных специализированных программ, имеющих много общих функций, однако математическое обеспечение которых рассчитано на решение отдельных классов задач [85].

В состав программного комплекса ANSYS входят [84,85]:

- ANSYS/Multiphysics – программа для широкого круга инженерных дисциплин, которая позволяет проводить расчеты в области прочности, распространения тепла, механики жидкостей и газов, электромагнетизма, а также решать связанные задачи;

- ANSYS/Mechanical – программа для выполнения проектных разработок, анализа и оптимизации: решение сложных задач прочности конструкций, теплопередачи и акустики. Эта программа позволяет определять перемещения, напряжения, усилия, температуры, давления и другие параметры, важные для оценки механического поведения материалов и прочности конструкции. Данная программа является подмножеством ANSYS/Multiphysics;

- ANSYS/Structural – выполняет сложный прочностной анализ конструкций с учетом разнообразных нелинейностей, среди которых геометрическая и физическая нелинейности, нелинейное поведение конечных элементов и потеря устойчивости. Используется для точного моделирования поведения больших и сложных расчетных моделей. Данная программа является подмножеством ANSYS/Mechanical;

- ANSYS/Thermal – это отдельная программа, выделенная из пакета ANSYS/Mechanical, для решения тепловых стационарных и нестационарных задач;

- ANSYS/LS-DYNA – программа, предназначенная для решения прочностных задач динамики при больших нелинейностях. Эта программа может использоваться для численного моделирования процессов формообразования материалов, анализа аварийных столкновений и ударов при конечных деформациях, включая пробивание, нелинейное поведение материала и контактное взаимодействие элементов конструкции;

- ANSYS/ED – представляет собой программу, обладающую возможностями ANSYS/Multiphysics, но имеющую ограничения по размерам расчетной модели. Эта программа предназначена для учебных целей.

5.4.1. Режимы работы программы ANSYS

Программа допускает два режима работы: пакетный (Batch) и интерактивный (Interactive) [84,85].

Пакетный режим – работа ANSYS-программы задается программой пользователя. Первая строка в файле должна быть /batch, обозначающая пакетный режим работы. Этот режим особенно эффективен при решении задач, не требующих постоянной связи с компьютером [84,85].

Интерактивный режим предполагает постоянное взаимодействие с компьютером: запуск команды пользователем, выполнение ее программой; задание другой команды пользователем и выполнение ее программой и т.д. Если

вы ошибетесь, можно исправить ошибку, повторно правильно набрав команду. Данный режим позволяет использовать наиболее подходящие свойства графического режима, построчной подсказки, системного меню и графического набора.

5.4.2. Маршрут моделирования элементов МСТ в ANSYS

Маршрут моделирования элементов МСТ с помощью программы ANSYS состоит из трех этапов: препроцессорная подготовка (Preprocessing), получение решения (Solving the equation) и постпроцессорная обработка результатов (Postprocessing) [84,85].

На стадии препроцессорной подготовки выполняется выбор типа расчета, построение модели и приложение нагрузок (включая граничные условия). На данном этапе задаются необходимые для решения исходные данные. Пользователь выбирает координатные системы и типы конечных элементов, указывает упругие постоянные и физико-механические свойства материала, строит твердотельную модель и сетку конечных элементов, выполняет необходимые действия с узлами и элементами сетки, задает уравнения связи и ограничения. Можно также использовать модуль статического учета для оценки ожидаемых размеров файлов и затрат ресурсов памяти.

На рис.5.13 представлен фрагмент конечно-элементной модели элемента МСТ.

Этап приложения нагрузок и получения решения включает в себя задание вида анализа и его опций, нагрузок, шага решения и заканчивается запуском на счет конечно-элементной задачи.

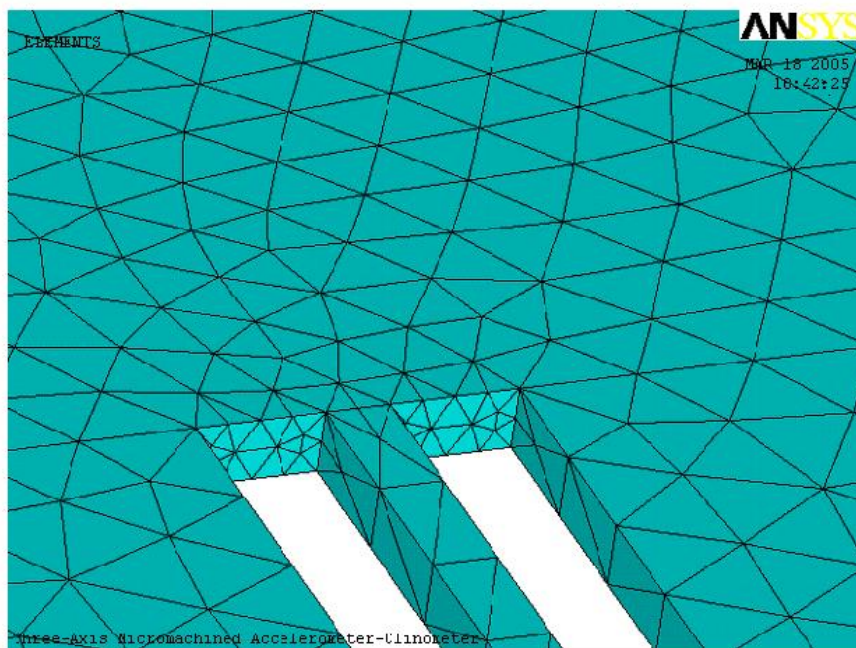


Рис.5.13. Конечно-элементная модель элемента МСТ

Программа ANSYS предусматривает два метода решения задач, связанных с расчетом конструкций (Structural problems): h-метод и p-метод. h-метод может применяться при любом типе расчетов (статический, динамический, тепловой и т.п.), а p-метод – только в линейном статическом анализе. Кроме того, h-метод требует более частой сетки, чем p-метод [85].

На этапе постпроцессорной обработки пользователь может обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом.

Результаты решения включают значения перемещений, температур, напряжений, деформаций, скоростей и тепловых потоков.

Итогом работы программы на постпроцессорной стадии является графическое и (или) табличное представление результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что номенклатура сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники очень широка. В настоящее время элементная база МСТ в значительной степени развивается благодаря разработке и применению новых структурных материалов, технологий изготовления, физических эффектов и принципов функционирования сенсорных и актюаторных элементов, расширению областей их использования.

В данном учебном пособии рассмотрены основные технологии изготовления и принципы функционирования сенсорных и актюаторных элементов МСТ, получивших наибольшее распространение за последнее десятилетие. Также рассмотрены системы автоматизированного проектирования элементов микросистемной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника.— 1999.— №1.— С.3-6.
2. Соколов Л.В. Сенсорные твердотельные микроприборы и микросистемы на основе MEMS-технологии // Зарубежная электронная техника.— 1999.— №1.— С.93-116.
3. Корляков А.В., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции «карбид кремния-нитрид алюминия // Микроэлектроника.— 1999.— Т.28. №3.— С.201-212.
4. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение.— М.: Техносфера, 2004.— 528с.
5. Васенко А., Епифанов В., Юдинцев В. Микроэлектромеханические системы. Настало время выходить в свет // Электроника: Наука, Технология, Бизнес.— 1998.— №5-6.— С.55-59.
6. Коноплев Б.Г. Микрооптикоэлектромеханические системы для экстремальных условий эксплуатации // Труды VI Международной научно-