

Державний вищий навчальний заклад  
«Прикарпатський національний університет імені Василя  
Стефаника»  
Фізико-технічний факультет  
Кафедра фізики і методики викладання

# *ДИПЛОМНА РОБОТА*

на здобуття освітнього рівня магістра

Методи мікрозондових досліджень поверхні

Виконала: студентка II курсу,  
групи Ф(со)м-21  
напряму підготовки  
(спеціальності)  
014.08 Середня освіта(фізика)

Купчак Тетяна Володимирівна  
Керівник: Ліщинський І.М.  
Рецензент: Никируй Л. І.

Івано-Франківськ

2020

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>I. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ТІЛА.....</b>	<b>5</b>
<b>II. МІКРОЗОНДОВА ДІАГНОСТИКА ПОВЕРХНІ.....</b>	<b>6</b>
<b>III. ЗАКОН РОБОТИ СКАНУЮЧИХ ЗОНДОВИХ МІКРОСКОПІВ .</b>	<b>10</b>
<b>IV. СКАНУЮЧІ КОМПОНЕНТИ (СКАНЕРИ) ЗОНДОВИХ МІКРОСКОПІВ.....</b>	<b>12</b>
<b>V. МЕТОДИ СКАНУЮЧОЇ ЗОНДОВОЇ МІКРОСКОПІЇ .....</b>	<b>15</b>
<b>5.1. Скануюча тунельна мікроскопія.....</b>	<b>15</b>
<b>5.2. Атомно-силова мікроскопія.....</b>	<b>22</b>
<b>5.3. Електросилова мікроскопія.....</b>	<b>40</b>
<b>5.4. Морфологія тонких плівок PbTe вирощених на слюдяних     підкладках. ....</b>	<b>44</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>51</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>52</b>

## ВСТУП

Фізика напівпровідників має велике значення у сучасному світі. Дослідження провідності різних матеріалів почали проводитися у ХІХ столітті. Вивчення властивостей напівпровідників почалося, коли виникла потреба в нових джерелах енергії. На основі напівпровідників були створені нові прилади: термоелектрогенератори, фотоелектричні та сегнетоелектричні прилади. Напівпровідники мають велику область застосування у всіх сферах. Окрім радіотехніки на основі напівпровідників розроблені фотодіоди, фотоелементи та інтегральні схеми. Це все привело до появи ЕОМ та ПК. Фізика напівпровідників, є найважливішою частиною прикладної фізики та фізики твердого тіла, має велике значення для фахівців з галузі електроніки.

В 1874 році німецьким фізиком Брауном було відкрито ефект однобічної провідності контакту метал-напівпровідник, було покладено дослідженням напівпровідникових структур. Структура яка являє собою границю між областями напівпровідника зі своїми особливими властивостями називається напівпровідниковою. Шари напівпровідника розділяє границя з електронним та дірковим типом електропровідності, тоді її називають р-п-переходом; гетеропереходом називається границя шарів різних сполук. Також використовують структури, які входять шари металу, діелектрика і напівпровідника.

В останній час швидкими темпами розвивається нова галузь фізики – ***фізика поверхні твердого тіла***. Для сучасної мікро- та оптоелектроніки є основне використання тонко плівкової технології, перехід від мікро- до нанометрових розмірів деяких значень, завдяки цьому і зросла роль поверхонь матеріалів.

Активні галузі таких виробів створюються у найбільш тонких шарах, властивості яких (механічні, хімічні, оптичні та інші) характеризуються елементарним Аатом, кристалічною структурою шорсткістю границь

розділу. Показник поверхні враховує також, що особливість границі розподілу двох середовищ може значно різнитися від об'ємних. Значить з'явилася необхідність цілеспрямованого розвитку поверхні твердого тіла із вперед заданими характеристиками, а відповідно і завдання діагностики (контролю) величини поверхні. Для розв'язку даної задачі система дослідження поверхні змушені бути по можливості неруйнівними та дозволяти призначати дані про систему і шорсткість надповерхневих пластинок товщиною з декількох мікрон до виділених моношарів. [1,2]

Досягнення в галузі мікро- і оптоелектроніки має нові методи визначення надповерхневих пластин кристалів [3, 4], і це дозволяє зробити аналіз рельєфу над гладких поверхонь із середньоарифметичною висотою нерівностей  $R_a < 10$  нм.

Способи діагностики поверхні дозволяють поділити їх на дві групи. Способи першої групи, фізичною основою яких є *емісійні явища* та *розсіювання мікрочастинок*, мають у зовнішньому контакті на поверхню твердого тіла, наприклад, допомагаючи при цьому електричному полю або пучку мікрочастинок (електрони, іони, X-промені та ін.), і діагностиці відбитого та вторинного імпульсів.

Способи другої групи - *скануючої зондової мікроскопії* – зводяться у діагностиці поверхні твердого тіла за допомогою спеціальних *зондів* (наприклад, тунельна та атомно-силового мікроскопія). Методи скануючої зондової мікроскопії мають значні переваги, отже володіють ангстремною та субангстремною роздільною здатністю.

Зазначені способи належать до небагатьох, які можуть зробити дослідження поверхонь вищих класів чистоти як моно-, так і полікристалів, і аморфних предметів також.

Метою такої роботи – є вивчення та розробка основ нових зондових способів дослідження поверхні напівпровідників.

## I. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ТІЛА

Всі методи визначення поверхні дозволяють розділити на три групи:

- 1) емісійні методи;
- 2) методи розсіювання мікрочастинок;
- 3) діагностика за допомогою твердотільних зондів.

Емісійні методи, фізичною основою мають емісійні явища, і поділяються на чисто емісійні та вторинно-емісійні. До числа чисто емісійних часто поділяють явища викидання з поверхні мікрочастинок під час нагрівання або електричного поля (польовий зовнішній вплив). Вторинно-емісійні явища з'являються під час дії на поверхню ТТ фотонів, електронів або атомарних (молекулярних) частинок (первинні частинки). Отже, емісійні методи прямують до викидання (отримання) мікрочастинок поверхні і їхнього повного обстеження та аналізу. В методах розсіювання мікрочастинок на розглядану поверхню поступає пучок мікрочастинок (наприклад, фотони), який розсіюється (відбивається) поверхнею і при цьому повідомляє потрібну про її параметри та значення. Діагностика яка за допомогою твердотільних зондів (мікрозондова діагностика) зводиться до сканування поверхні унікальним зондом (голкою, щупом), рух вістря якого має залежність від форми поверхні та будь-яких, її значень (наприклад, магнітних).

Методи можуть ділитися за *ступенем локалізації*, тобто на топографічні (локальні) та інтегральні [5]. Досліджуючи поверхні часто беруть до уваги електромагнітне випромінювання, тоді методи будуть класифікувати по *діапазону випромінювання* (інфрачервоні, видимі, ультрафіолетові та Х-промені).

Методи визначення поверхні можна поділяти на *руйнуючі* й *неруйнуючі*, *контактні* та *безконтактні* [5]. Оцінюючи якісні та кількісні параметри геометрії поверхні предметів з різноманітних матеріалів має свій ряд залежностей, які можуть бути фізико-хімічними

властивостями цих матеріалів. Потрібно враховувати твердість та міцність даного матеріалу, що забороняє застосування контактних методів.

## II. МІКРОЗОНДОВА ДІАГНОСТИКА ПОВЕРХНІ

Розглянувши історію перших зондових (щупових) методів, починати потрібно з механічних методів, які розглядають сканування поверхні за допомогою твердотілого зонда-голки [5]. Ось такі методи називають контактними, оскільки в даному процесі сканування поверхня голки механічно працює з індивідуальним елементом поверхні (рис.2.1). Це забезпечує продуктивність та якісну роботу, але свої недоліки. Даний принцип використовують при побудові різноманітних профілографів та профілометрів. Дані щупові електромеханічні прилади, які використовують при визначенні шорсткості поверхні, є прикладами профілометрами, а такі самі приклади використовують для запису нерівностей поверхні – профілографами. При даних механічних методах точність є невисокою та враховується пошкодження поверхні голкою.

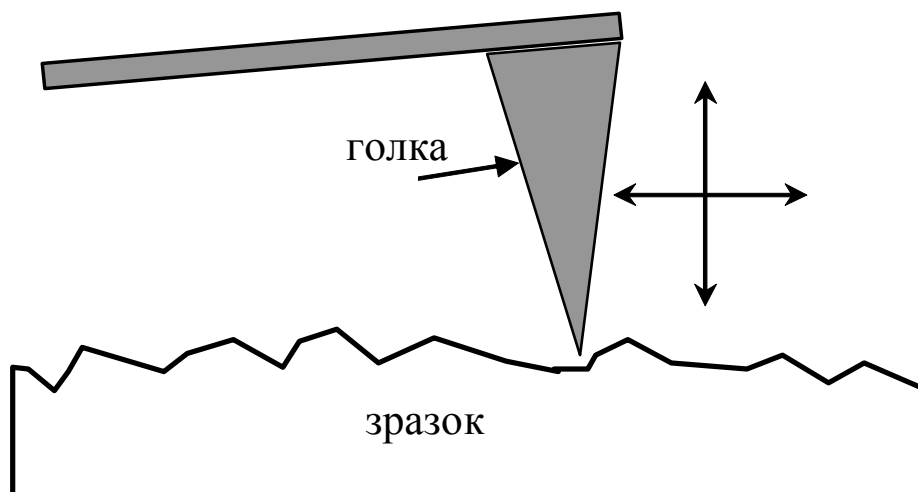


Рис.2.1. Схема при спостереженні поверхні зондовими методами

Розглядаючи електромеханічні перетворюючі (індукційні, індуктивні, електронні та п'єзоелектричні), у механічних зондових методах коливання голки переходять в електричні сигнали.

В електромеханічних щупових пристроях розглядаються *індукційні перетворювачі*, було виявлено у витках котушки у яких скерована електрорушійна сила, яка переставлена в полі постійного магніту під дією обчислюваної голки. Частіше за все у сучасних пристроях беруть до уваги індивідуальні перетворювачі.

Дія індуктивного перетворювача розглядає принцип, який полягає в тому, що алмазна голка, яка зондує поверхню, механічно пересуває коромисло. Переміщення коромисла переміщує повітряні проміжки між якорем і сердечником диференційного трансформатора, де взято дві однакові обмотки. При зміні повітряних проміжків змінюється магнітний потік у трансформаторі, значить і напруга на його виході.

Електронний *мехатронний перетворювач* представляє електронну лампу з електродом, який рухається (звичайно анодом), а на вихідному з корпусу контакті якого розташована голка, яка призначена для зондування поверхні.

Використані *п'єзоелектричні перетворюючі*, які призначені для перетворення механічного переміщення в електричну напругу, розглядаються в декількох конструкціях щупових приладів.

Сучасні поліграфи мають досить малу вимірювану силу (не перевищують 1 мН), це дозволяє їм виміряти та визначити параметри шорсткості (середню арифметичну висоту нерівностей  $R_a$  в межах від 0,04 до 8 мкм на базових довжинах від 0,08 до 2,5 мм) із найменшим пошкодженням поверхні.

Переглядаючи із найбільш кращих методів дослідження поверхні, то перевагу можна надати методу скануючої зондової мікроскопії (СЗМ). В нас час у науковому спектрі досліджень мають місце п'ять видів СЗМ:

- 1) скануюча тунельна мікроскопія (СТМ);
- 2) атомно-силова мікроскопія (АСМ);
- 3) електросилова мікроскопія (ЕСМ);
- 4) магніто- силова мікроскопія (МСМ);
- 5) ближньопольова оптична мікроскопія (БОМ).

В області досліджень фізики поверхні або тонких плівок більшість дослідів базуються на використанні методів СТМ.

В 1981 році науковцями Г.Биннігом і Г.Рорером, які були швейцарцями, було винайдено перший з зондових мікроскопів, який був скануючим тунельним мікроскопом [6]. Про те, що СТМ має значення просторової роздільної здатності, яка є близькою до атомарної, у своїх записах розказали Г.Биннігом і Г.Рорером. Ці вчені зробили велики внесок у розвиток зондової мікроскопії.

Метод СЗМ допомагає розглядати поверхні з субнанометровою та навіть субангстемною роздільною здатністю [7,8]. Вважаючи, що в СЗМ картографування висот поверхні роблять на основі вимірювань, які є прямими (на відміну від оптичної та електронної мікроскопії), значить, цифрова обробка даних вважається наступною і отримує можливість призначати глибокий кількісний аналіз найрізноманітніших значень та характеристик поверхні.

Якщо розглянути принцип роботи СЗМ, то перш за все потрібно врахувати, що СЗМ ґрунтується на основі того, що між близькими (на відстанях порядку декількох мікрон і менше) параметрами розвиваються сили притягання – відштовхування різної природи (кулонівські, ван-дер-ваальсівські), яка має відомості, які характеризують відстань між предметами. При скануванні поверхні матеріалу твердим надгострим зондом (з радіусом заокруглення вістря 5-20 нм) враховуючи вид обміну взаємодії між зондом та поверхнею отримується вигляд рельєфу поверхні зразка, це означає, що перерозподіл магнітних або електричних полів і



зовсім наступних фізико-хімічних характеристик поверхні. Обчислення та вимірювання дають можливість проводитися як у найбільшому вакуумі при дослідженні атомно-чистих поверхонь, так і на повітрі і в рідкому середовищі. Якщо не враховувати схожі принципи роботи, різні принципи СЗМ можуть мати власні, строго визначені, галузі вживання. Роздільну здатність порядку  $1\text{\AA}$  в площині екземпляр і порядку  $0,05\text{\AA}$  по нормалі до поверхні, демонструють значно високу чутливість до властивостей поверхні атомарних розмірів називають *тунельними мікроскопами* [9]. Враховуючи, що в основі роботи СТМ з'являється така умова електропровідності, що присутність діелектричних ділянок на поверхні взагалі не враховує користування цим приладом.

Говорячи про *силові мікроскопи* [10] потрібно врахувати, що вони є чутливими до предметів, які є дещо більших розмірів (порядку  $0,5-10\text{\AA}$ ), але роблять як на провідних, так і на діелектричних поверхнях, а ще в одному циклі крім топографії можуть картографувати й зовсім інші ознаки поверхні. Прикладами фрагментів рельєфу і профілю (рис.2.2) поверхні, дані методом АСМ.

Розглядаючи різні типи поверхні матеріалу, який досліджується і заданої проблеми СЗМ задається в різних правилах роботи:

- контактний режим, при якому зонд безпосередньо торкається голкою поверхні зразка і працює на відштовхуванні від поверхні;
- безконтактний режим, при якому детектуються амплітуда, частота або фаза коливань зонда, що несуть інформацію про параметри поверхні.
- режим періодичного контакту ("тапінг режим"), подібний до безконтактного, за виключенням того, що зонд коливається (на частоті власного механічного резонансу, порядку  $120-400\text{ кГц}$ ) на такій відстані від поверхні зразка, що в своїй найнижчій точці торкається її [11].

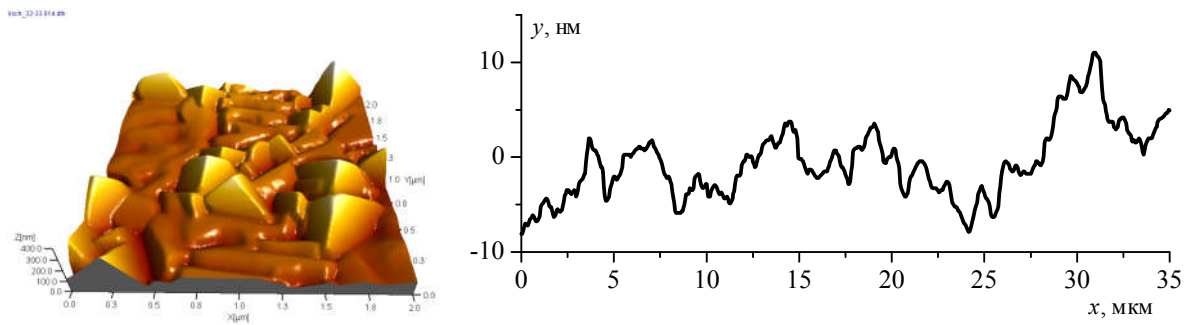


Рис.2.2. Фрагменти рельєфу та профіль поверхні плівки PbTe, одержані методом АСМ [12]

Застосування СЗМ є дуже ефективне в поєднанні з наступними методами розглядання поверхні, прикладом цього є Х-промені. Про більше детальні методи СЗМ буде мого говорити у наступному розділі.

### ІІІ. ЗАКОН РОБОТИ СКАНУЮЧИХ ЗОНДОВИХ МІКРОСКОПІВ

В скануючих зондових мікроскопах дослідження поверхні твердого тіла, зокрема рельєфу, робляться завдяки зондів, і це все має зображення у вигляді голок [12]. Головний процес є робочою частиною такого зонда (вістря) і при цьому мають бути заміри наближені до десяти нанометрів. Основною характерною ознакою є відстань між зондом та поверхнею можна вважати приблизно 0,1 – 10 нм.

У даному розділі будемо говорити про основні та загальні риси зондових мікроскопів. Будемо вважати що, характерна взаємодія зонда з поверхнею буде позначатися і матиме характеристику параметра  $P$ . Припустимо, що десь є достатньо чітка та взаємно однозначна відносність параметра  $P$ , яка залежить від того на якій відстані розташований зонд – зразок  $P = P(z)$ , використання цього параметра зводиться для того, щоб організувати структуру *оберненого зв'язку* (ОЗ), що знаходить відстань, яка є між зразком та зондом (рис.3.1).

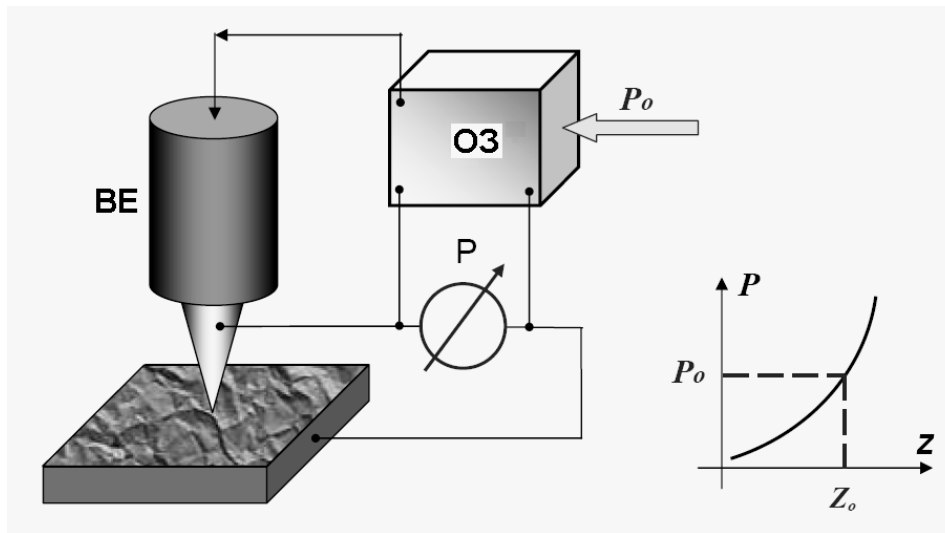


Рис. 3.1. Схема організації системи оберненого зв'язку скануючого зондового мікроскопа [12]

Даний механізм оберненого зв'язку отримує наслідок, який параметр  $P$  є постійним та рівним параметру  $P_0$ , що враховується оператором. Розглянемо, якою є відстань зонд-поверхні, яка перетворюється (наприклад, збільшується), тоді здійснюється зміна (збільшення) параметра  $P$ . в структурі ОЗ виробляється різницевий сигнал, який є пропорційний мірі  $\Delta P = P - P_0$ , і в свою чергу має підсилення та подається на виконавчий елемент (ВЕ). Це елемент характеризує різницевий сигнал, який при наближенні зонда до поверхні або відхиляючи його до того часу, доки даний різницевий сигнал не перетвориться в нуль. Отже, відстань, яка контролює зонд-зразок, можна визначати з великою точністю. Коли взяти до прикладу, існуючі зондові мікроскопи точність утримання відстані зонд-поверхня може досягти значення  $\sim 0,01 \text{ \AA}$ . Враховуючи дії зонда вздовж поверхні зразка здійснюється деяка зміна параметра, який взаємодіє  $P$ , що визначено зміною рельєфу або зовсім інших локальних характеристик поверхні. Система ОЗ обробляє ці зміни таким чином, що при переміщенні зонда у площині  $XU$  сигнал на виконавчому елементі є пропорційним до властивостей поверхні (наприклад, рельєфу).

Для отримання СЗМ зображень проводиться спеціальним чином організований процес, який називається скануванням зразка. Скануючи зонд, перш за все, враховують рух, коли зонд саме перше рухається над зразком прямуючи по певній лінії (рядкова розгортка), але тоді значення сигналу на виконавчому компоненті, який є пропорційний до висоти рельєфу поверхні, записується в пам'ять комп'ютера. Записаний при скануванні сигнал оберненого зв'язку обробляється комп'ютером, і коли СЗМ рисунок рельєфу поверхні  $Z = f(x,y)$  ґрунтується з допомогою засобів комп'ютерної графіки. Дослідження рельєфу поверхні, зондових мікроскопів дозволяє розглянути та вивчити найрізноманітніші характеристики поверхні: механічні, електричні, магнітні, оптичні та інші.

#### **IV. СКАНУЮЧІ КОМПОНЕНТИ (СКАНЕРИ) ЗОНДОВИХ МІКРОСКОПІВ**

Оскільки СЗМ володіє роздільною здатністю порядку десятих ангстрема, тому дуже важливо, щоб рух зонда відбувався максимально близько до поверхні й контролювався з ангстремною точністю [13]. Розв'язати цю задачу можна за допомогою професійних маніпуляторів - скануючих елементів (*сканерів* або *п'єзосканерів*). Із п'єзоелектриків – матеріалів, роблять скануючі елементи зондових мікроскопів, які при цьому можуть мати п'єзоелектричними властивостями [12].

П'єзоелектрики можуть міняти свої параметри в зовнішньому електричному полі відносно того рівняння, яке є рівнянням зворотного п'єзо ефекту. Розглядаючи технічні пристрої, найбільшого поширення отримали перетворювачі з п'єзокерамічних матеріалів (наприклад, титанад цирконію, титанад цирконату свинцю). П'єзокераміка – це поляризований полікристалічний матеріал, одержуваний з порошоків кристалічних сегнетоелектриків.

Скануюча зондова мікроскопія найбільшого значення змогла отримати трубчасті (рис. 4.1). Ці елементи можуть одержувати достатньо великі переміщення предметів враховуючи досить невеликі керуючі напруги.

Трубчасті п'єзоелементи - це такі порожнисті тонкостінні циліндри, які роблять із пьезокерамічних матеріалів. Електроди, які формуються у вигляді тонких шарів металу, мають наноситися на зовнішню та внутрішню поверхні трубки, а виступи цієї трубки повинні залишатися непокритими.

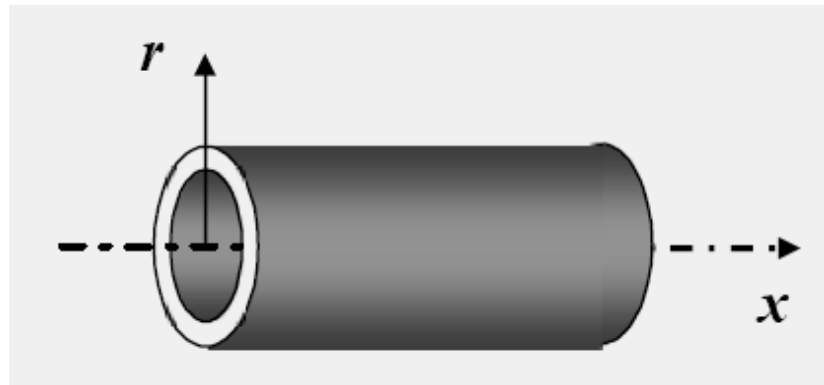


Рис. 4.1. Трубчастий п'єзоелемент

Коли під дією різниці потенціалів, які знаходяться між внутрішнім та зовнішнім електродами трубка міняє свої повздовжні розміри, тоді абсолютне видовження п'єзотрубки рівне

$$\Delta x = d_{\perp} \frac{l_0}{h} V, \quad (4.1)$$

де  $d_{\perp}$  - компонент тензора п'єзоелектричних коефіцієнтів (напрямок деформації перпендикулярний до напрямку електричного поля),  $h$  - товщина стінки п'єзотрубки,  $V$  - різниця потенціалів між внутрішнім і зовнішнім електродами. Отже, при одній і тій же нарузі  $V$  подовження трубки буде тим більше, чим більше її довжина і чим менше товщина її стінки.

З'єднання трьох трубок в один вузол (рис.4.2) дає можливість організувати прецизійні переміщення зонда мікроскопа у трьох напрямках,

які є взаємно перпендикулярними,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Таким чином, даний скануючий елемент називається три подом.

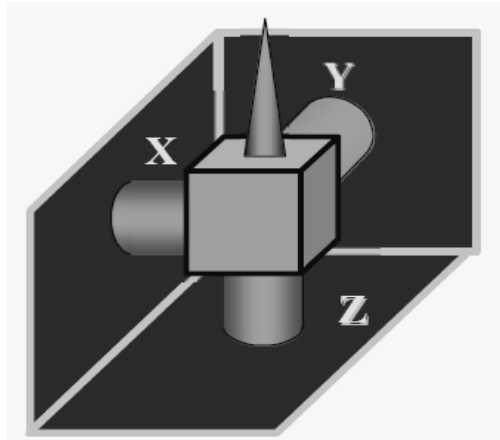


Рис. 4.2. Скануючий елемент, який має вигляді трипода, що зібраний на трубчастих п'єзоелементах [12]

Недоліками такого сканера є складність виготовлення і сильна асиметрія конструкції. На сьогоднішній день в скануючій зондовій мікроскопії найбільш часто використовуються сканери, виготовлені на основі одного трубчастого елемента. Загальний вид трубчастого сканера і схема розташування електродів представлені на рис.4.3. Матеріал трубки має радіальний напрям вектора електричної поляризації  $\vec{P}$ .

Внутрішній електрод звичайно є суцільним. Зовнішній електрод сканера розділений на чотири секції (вздовж напрямку осі циліндра). При подачі напруги у протифазі на протилежні секції зовнішнього електроду (щодо внутрішнього) відбувається скорочення ділянки трубки в тому місці, де напрям поля співпадає з напрямом поляризації  $\vec{P}$ , і подовження там, де вони направлені в протилежні сторони. Це приводить до вигину трубки у відповідному напрямі й дозволяє здійснювати сканування в площині  $XU$ . Зміна потенціалу внутрішнього електроду щодо всіх зовнішніх секцій приводить до подовження або скороченню трубки по осі  $Z$ . Таким чином, можна реалізувати трьохкоординатний сканер на базі однієї п'єзотрубки.

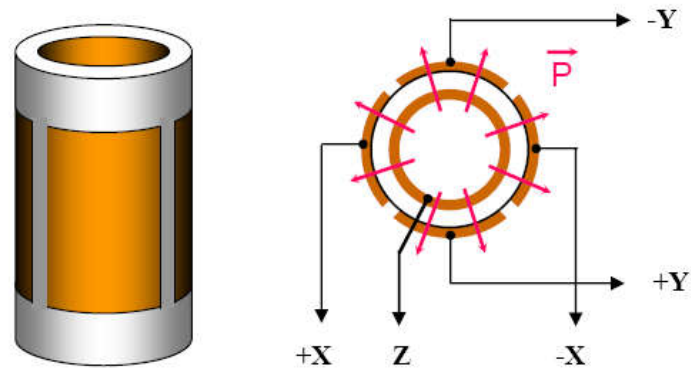


Рис. 4.3. Трубчастий п'єзосканер [12]

Широке поширення набули також сканери на основі біморфних п'єзоелементів. Біморф – це дві пластини п'єзоелектрика, які склеєні між собою таким чином, що вектори поляризації в кожній з них направлені в протилежні сторони. Якщо подати напругу на електроди біморфа, то одна з пластин буде розширюватися, а інша - стискатися, що приведе до вигину всього елемента. У реальних конструкціях біморфних елементів створюється різниця потенціалів між внутрішнім загальним і зовнішніми електродами.

## V. МЕТОДИ СКАНУЮЧОЇ ЗОНДОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

### 5.1. Скануюча тунельна мікроскопія

Метод СТМ [12, 14] базується на ефекті залежності величини тунельного струму  $j$  між голкою-зондом і досліджуваною поверхнею від відстані  $z$  голки до поверхні. Система переміщення рухає зонд у вертикальній площині таким чином, щоб забезпечити постійний тунельний струм, тобто постійне значення потенціального бар'єру. У такому випадку рух вістря голки повторює геометричний рельєф поверхні.

Першим серед зондових мікроскопів виявився скануючий тунельний мікроскоп. Принципом його дії СТМ здійснювався на явищі *тунелювання* електронів через вузький *потенціальний бар'єр*, який знаходився поміж металевим зондом і провідним зразком в зовнішньому електричному полі.

У СТМ зонд підводиться до поверхні зразка на таку дальність, яка складала декілька ангстрем. Ось при таких умовах і створюється тунельно-прозорий потенціальний бар'єр, величиною який характеризується значеннями роботи виходу електронів з матеріалу зонда  $\phi_p$  та зразка  $\phi_s$  (рис.5.1). Якщо при детальному перегляді бар'єр можна вважати прямокутним з ефективною висотою, яка дорівнює середній роботі виходу матеріалів:

$$\phi^* = \frac{1}{2}(\phi_p + \phi_s). \quad (5.1)$$

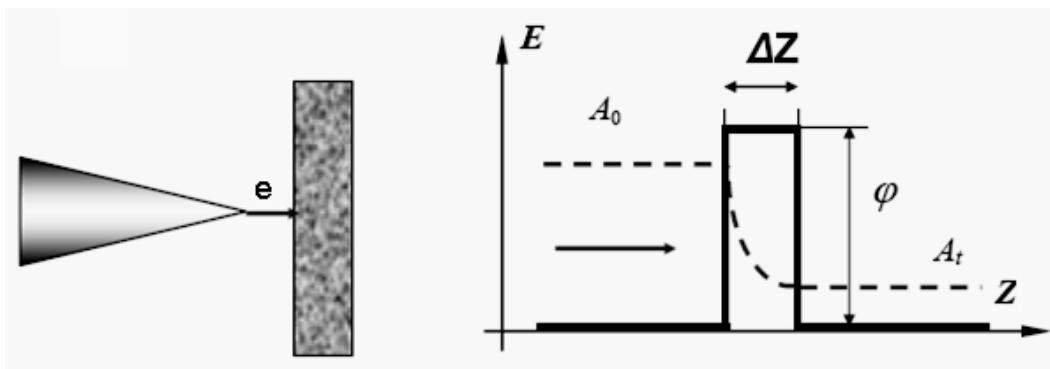


Рис. 5.1. Схема тунелювання електронів через потенціальний бар'єр у тунельному мікроскопі [12]

Згадуючи квантову механіку, то ймовірність тунелювання електрона (коефіцієнт проходження) через одновимірний бар'єр прямокутної форми рівна

$$W = \frac{|A_t|^2}{|A_0|^2} \cong e^{-k\Delta Z}, \quad (5.2)$$

де  $A_0$  - амплітуда хвильової функції електрона, який прямує до бар'єру;



$A_t$  - амплітуда хвильової функції електрона, який пройшов крізь бар'єр;  
 $k$  - константа затухання хвильової функції в місці, яке має відношення до потенційного бар'єру;  $\Delta Z$  - ширина бар'єру. Константу затухання при тунельному контакті двох металів можна записати у такому представленні

$$k = \frac{4\pi\sqrt{2m\varphi^*}}{h}, \quad (5.3)$$

де  $m$  - маса електрона,  $\varphi^*$  - середня робота виходу електрона,  $h$  - стала Планка.

Електрони, які мають енергію в околі рівня Фермі  $E_F$  (рис.5.1), здебільшого, приймають участь в процесі тунелювання. Тому при контакті двох металів приклад для густини тунельного струму можна було одержати в роботі [16]:

$$j_t = j_0(\varphi^* \exp(-A\sqrt{\varphi^*} \cdot \Delta Z) - (\varphi^* + eV) \exp(-A\sqrt{\varphi^* + eV} \cdot \Delta Z)), \quad (5.8)$$

де параметри  $j_0$  і  $A$  задаються наступними виразами:

$$j_0 = \frac{e}{2\pi h(\Delta Z)^2}, \quad A = \frac{4\pi}{h}\sqrt{2m}. \quad (5.9)$$

За умови малих напруг зсуву ( $eV < \varphi$ ), вираз для густини струму спрощується

$$j_t = j_0(V) \exp\left(-\frac{4\pi}{h}\sqrt{2m\varphi^*} \cdot \Delta Z\right), \quad (5.12)$$

і тоді дану величину  $j_0(V)$  можна розглядати незважаючи на зміни відстані зонд-зразок. Значення роботи виходу є типовими ( $\varphi \sim 4$  еВ), тоді значення константи затухання  $k = 2 \text{ \AA}^{-1}$ , значить коли буде зміна  $\Delta Z$  на  $\sim 1 \text{ \AA}$  величина струму почне змінюватися на порядок. Тунельний контакт в СТМ насправді не є одновимірним і тому має складну геометрію, тому загальні риси тунелювання, а найголовніше експоненціальна залежність струму від відстані зонд-зразок, також зберігається, якщо розглядати і складніші моделі, що підтверджено експонентально.

При великих напругах зсуву ( $eV > \varphi^*$ ) польова емісія електронів у вакуум описується відомою формулою Фаулера-Нордгейма [12]:

$$J = \frac{e^3 V^2}{8\pi h \phi^* (\Delta Z)^2} \exp\left[-\frac{8\pi\sqrt{2m}(\phi^*)^{3/2} \Delta Z}{3ehV}\right]. \quad (5.14)$$

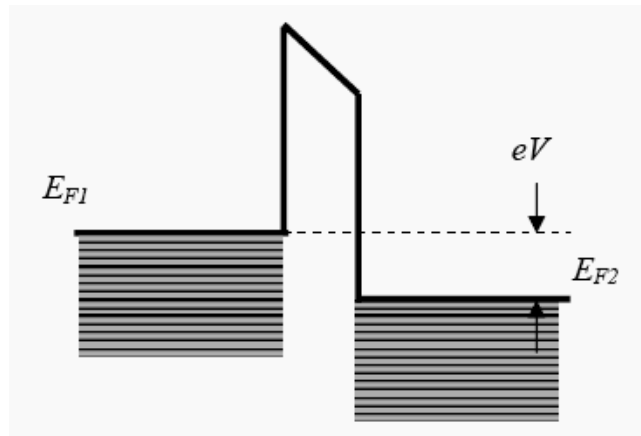


Рис.5.2. Енергетична діаграма тунельного для контакту двох металів

Експоненціальна залежність, якою володіє тунельний струму від відстані (5.2) дозволяє зробити регулювання відстані між зондом і зразком в тунельному мікроскопі з дуже високою точністю. СТМ є електромеханічною системою з від'ємним зворотним зв'язком. Значення тунельного струму між зондом і зразком на відповідному рівні ( $I_0$ ), що вибирається оператором називається системою зворотного зв'язку. Контролювати величину тунельного струму та відстані зонд-поверхня можна тоді, коли переміщення зонда, яке є вздовж осі  $Z$  за допомогою п'єзоелектричного елемента.

Рельєф на зображенні поверхні у СТМ розглядається і формується двома методами. Одним із них є метод постійного тунельного струму (рис.5.3а), при цьому зонд змінює положення вздовж поверхні, і робить растрове сканування; але тоді зміна напруги на  $Z$ -електроді п'єзоелемента в ланцюзі зворотного зв'язку (яка з великою точністю повторює рельєф поверхні зразка) в пам'яті комп'ютера має запис, який виглядає як функція  $Z=f(x,y)$ , але пізніше відновлюються засобами комп'ютерної графіки.

Якщо розглядати атомарно гладкі поверхні найбільш ефективним є отримання СТМ рисунка поверхні за методом постійної висоти  $Z = const$ .

У цьому випадку зонд переміщується, яке знаходиться над поверхнею на відстані декількох ангстрем, і тоді зміна тунельного струму реєструються в якості СТМ зображення поверхні (рис.5.3б). Сканування виконується або при повністю відключеній системі ОЗ, або з швидкостями, які значно перевищують швидкість реакції ОЗ, тому ОЗ має реакцію тільки на плавні зміни рельєфу поверхні. При цьому способі можна бачити дуже високі швидкості сканування та високу частоту отримання СТМ зображень.

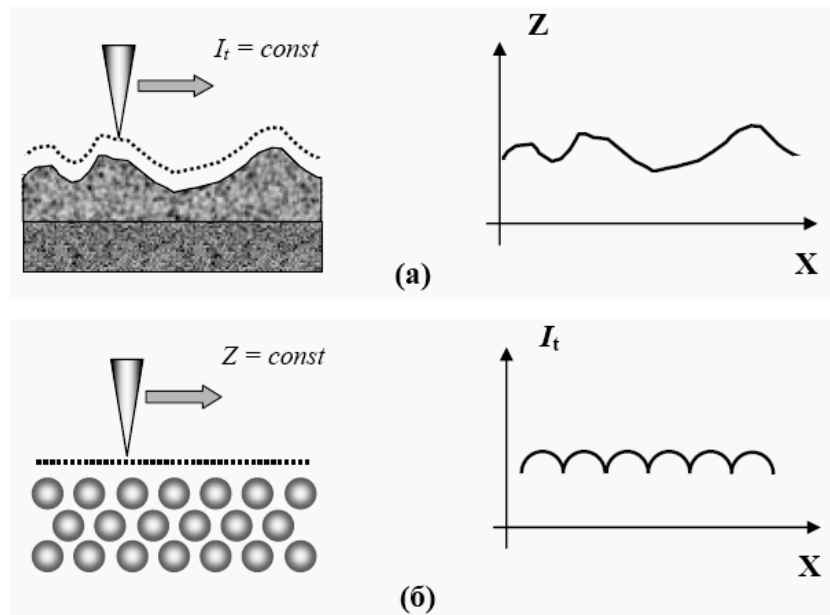


Рис. 5.3. Формування СТМ зображень поверхні методом постійного тунельного струму (а) і постійної середньої відстані (б) [12]

Експоненціальна залежність тунельного струму від відстані до поверхні залежить виключно від високої просторової здатності СТМ. В напрямі по нормалі до поверхні роздільна здатність набуває часток ангстрема. Латеральною роздільною здатністю є залежить від якості зонда і визначається, в основному, не макроскопічним радіусом кривизни вістря зонда, а його атомарною структурою.

Якщо правильно підготувати зонд на його вістрі найбільш ймовірно перебуває або одиничний виступаючий атом, або невеличкий кластер атомів, що починає діяти на розмірах значно менших за той радіус

кривизни вістря. Між поверхневими атомами зразка та атомами зонда, насправді, має протікати тунельний струм. Атом, який виступає над поверхнею зонда, повинен бути ближче до поверхні на відстань, рівну величині періоду кристалічних ґратки. Оскільки залежність тунельного струму від відстані експоненційна, тому струм у цьому випадку тече, в основному, між поверхнею зразка і виступаючим атомом на кінчику зонда (рис.5.4).

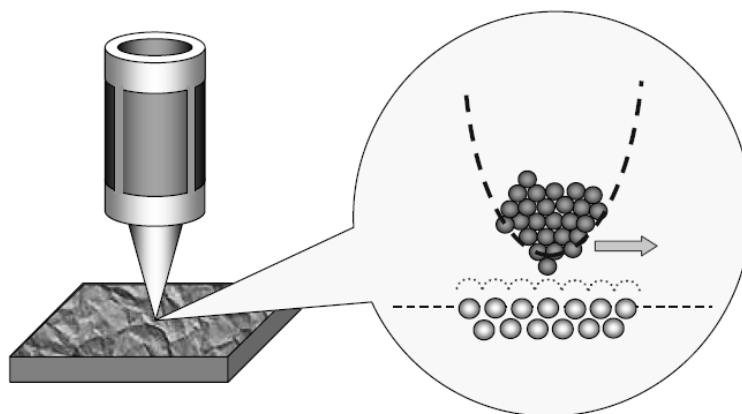


Рис. 5.4. Реалізація атомарної роздільної здатності у скануючому тунельному мікроскопі [12]

Якщо брати до уваги, що допомога таких зондів дає одержати просторову роздільну здатність на рівні атомарної, що наведено різними дослідницькими групами на зразках з різних матеріалів (рис.5.5).

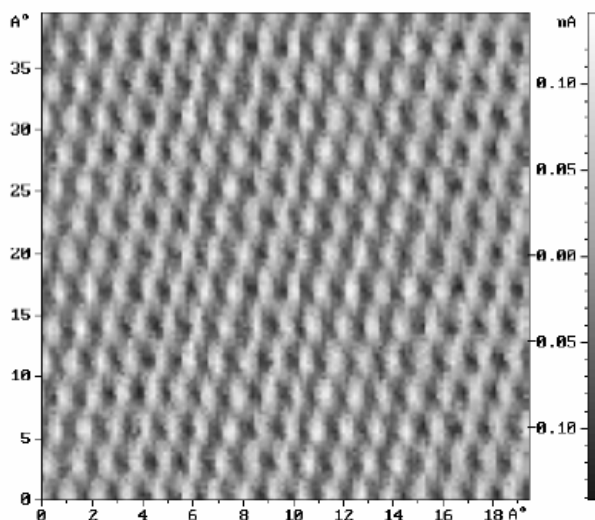


Рис. 5.5. СТМ зображення атомарної структури поверхні піролітичного графіту [12]

## Вимірювання вольт-амперних характеристик тунельного контакту

Враховуючи допомогу СТМ отримується *вольт-амперні характеристики* (ВАХ) тунельного контакту в різних точках поверхні, і це дозволяє знайти локальну провідність зразка і розглянути особливості локальної густини станів у енергетичному спектрі електронів. Щоб зареєструвати вольт-амперну характеристику тунельного контакту в СТМ приймається зовсім інша процедура. СТМ зображення поверхні обирає таку область зразка, для якої повинно проводитися вимірювання. Отже, зонд СТМ потрібно вивести сканером у відповідну точку поверхні. Щоб одержати ВАХ контактний зворотний зв'язок на короткий розділяється, і до тунельного проміжку лінійно зростаюча напруга (рис.5.6). Протікаючий через тунельний контакт, при цьому синхронно із зміною напруги реєструється струмом. Для результату ВАХ на час розриву зворотного зв'язку на електрод сканера подати потенціал, рівний потенціалу в даний час перед розривом.

Для кожної точки виконується зчитування певної кількості ВАХ. Кінцева вольт-амперна характеристика може бути отримується шляхом усереднення набору ВАХ, зчитаних в одній точці. Усереднення має дозвіл значно зменшити вплив шуму тунельного проміжку на корисний сигнал.

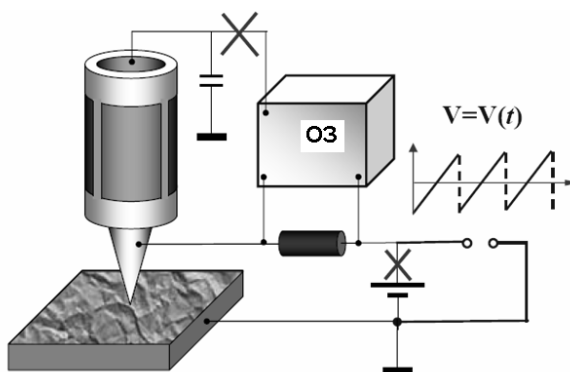


Рис. 5.6. Схема реєстрації ВАХ тунельного проміжку СТМ [12]

## 5.2. Атомно-силова мікроскопія

В 1986 році Гердом Біннігом, Келвіном Куейтом і Крістофером Гербером було винайдено атомно-силовий мікроскоп. Для роботи АСМ потрібно розглянути силову взаємодію між зондом та поверхнею, для того щоб пройти реєстрацію використовують спеціальні зондові датчики, що представляють собою пружну консоль з гострим зондом на кінці (рис.5.7).

Сила, діюча на зонд зі сторони поверхні, зводиться до вигину консолі.

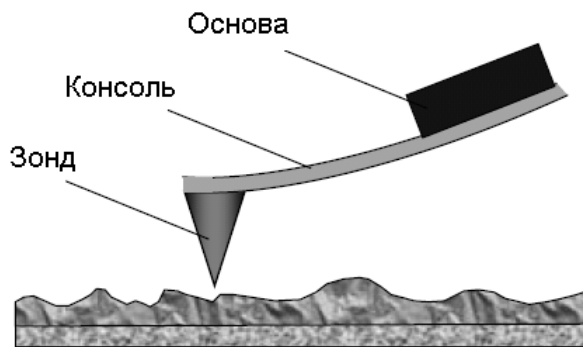


Рис. 5.7. Схематичне зображення зондового датчика АСМ [12]

На прикладі сили Ван-дер-Ваальса можна пояснювати якісну роботу АСМ. Енергія ван-дер-ваальсової взаємодії двох атомів найбільше перебуває на відстані  $r$  один від одного, апроксимують степеневою функцією - потенціалом Леннарда-Джонса (рис.5.8):

$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 + \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\}. \quad (5.21)$$

У виразі, який представлено вище перший доданок виражає далекодіюче притягання, яке в основному характеризується, диполь - дипольною взаємодією атомів. Другий доданок враховує відштовхування атомів на малих відстанях; параметр  $r_0$  - рівноважна відстань між атомами,  $U_0$  - значення енергії в мінімумі.

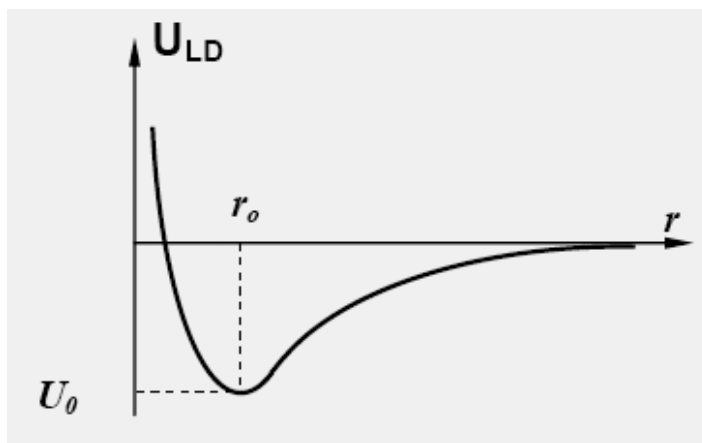


Рис. 5.8. Якісний вид потенціалу Леннарда – Джонса

У цьому випадку сила, яка є силою взаємодії має як нормальну до поверхні, так і латеральну (лежачу в площині поверхні зразка) складові.

Реальна взаємодія зонда із зразком має складніший характер, проте основні риси даної взаємодії зберігаються - зонд АСМ сприймає притягання зі сторони зразка на великих відстанях і відштовхування на малих.

Отримання АСМ зображень рельєфу поверхні характерне з реєстрацією малих вигинів пружної консолі зондового датчика. В атомно-силовій мікроскопії є вибране завдання, яке має за свою мету використання оптичних методів (рис.5.9).

Тому оптична система АСМ виступає так, щоб випромінювання напівпровідникового лазера свій фокус робив на консолі зондового датчика, а тоді відбитий промінь мав потрапити у центр фоточутливої області фотоприймача.

В якості позиційно - чутливих фотоприймачів застосовуються чотирьохсекційні напівпровідникові фотодіоди.

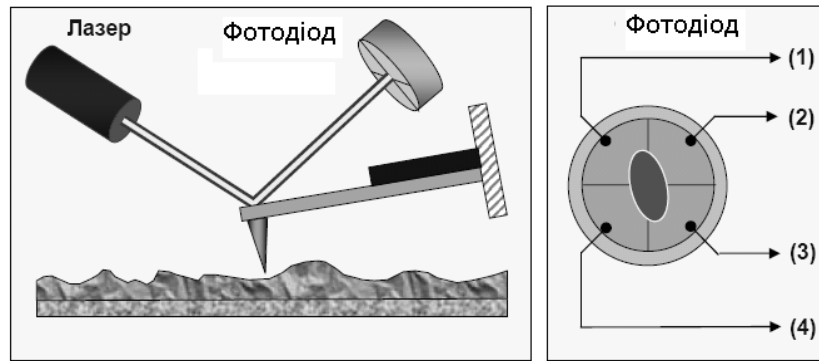


Рис. 5.9. Схема оптичної реєстрації вигину консолі зондового датчика АСМ [12]

Параметри, які є основними реєстрованими оптичною системою називаються деформації вигину консолі під дією  $Z$ -компонент сил тяжіння або відштовхування ( $F_Z$ ) і деформації кручення консолі під дією латеральних компонент сил ( $F_L$ ) взаємодії зонда з поверхнею.

Коли позначити початкові значення фотоструму в секціях фотодіода через  $I_{01}, I_{02}, I_{03}, I_{04}$ , а через  $I_1, I_2, I_3, I_4$  - це значення струмів після зміни положення консолі, то різницеві струми з різних секцій фотодіода  $\Delta I_i = I_i - I_{0i}$  однозначно визначатимуть величину і напрям вигину консолі зондового датчика АСМ. Отже, різниця струмів матиме вигляд і буде

$$\Delta I_Z = (\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4)$$

пропорційна вигину консолі під дією сили, діючої по нормалі до поверхні зразка, а комбінація різницевих струмів вигляду

$$\Delta I_L = (\Delta I_1 + \Delta I_4) - (\Delta I_2 + \Delta I_3)$$

характеризує вигин консолі під дією латеральних сил (рис.5.10 б). Величина  $\Delta I_Z$  зазначається як вхідний параметр в петлі зворотного зв'язку атомно-силового мікроскопа (рис.4.1). Система зворотного зв'язку (ОЗ) забезпечує значення  $\Delta I_Z = \text{const}$  за допомогою п'єзоелектричного виконавчого елемента, який підтримує вигин консолі  $\Delta Z$  рівним величині  $\Delta Z_0$ , яка встановлюється оператором.

Коли сканування зразка в режимі  $Z = \text{const}$  зонд буде змінювати положення вздовж поверхні, і при цьому напруга на  $Z$ -електроді сканера



записується в пам'ять комп'ютера як рельєф поверхні  $Z = f(x, y)$ . Просторова роздільна здатність АСМ характеризується радіусом заокруглення зонда та чутливістю системи, яка фіксує відхилення консолі. В наш час готові конструкції АСМ, дозволяють одержувати атомарну роздільну здатність при дослідженні поверхні зразків.

Зондування поверхні в атомно-силовому мікроскопі виконується за допомогою спеціальних зондових датчиків, які являють собою пружну консоль (*cantilever*) з гострим зондом на кінці (рис.5.11). Датчики виготовляються методами фотолітографії і травлення з кремнієвих пластин. Пружні консолі формуються, в основному, з тонких шарів легованого кремнію,  $\text{SiO}_2$  або  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

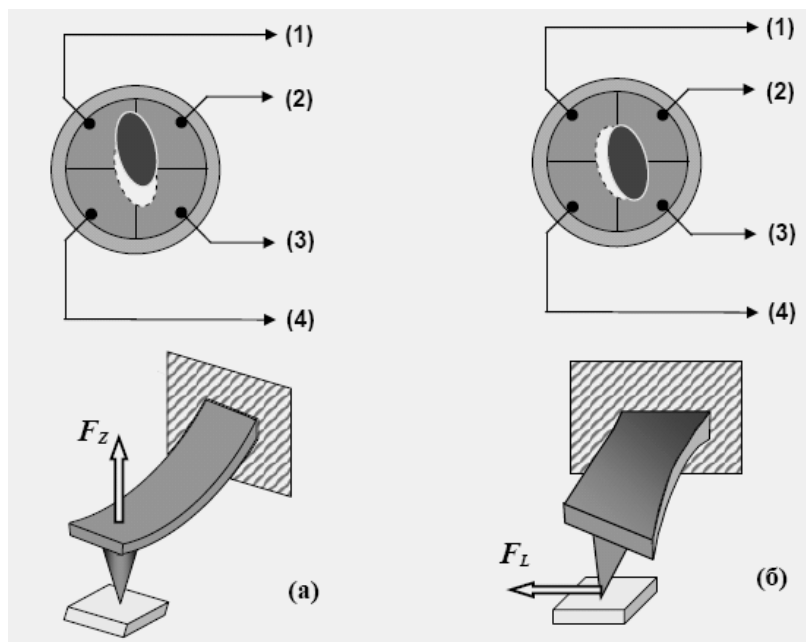


Рис. 5.10. Відповідність між типом згинаючих деформацій консолі зондового датчика і зміною положення променя на фотодіоді:

а) згин під дією нормальних сил; б) латеральних сил [12]

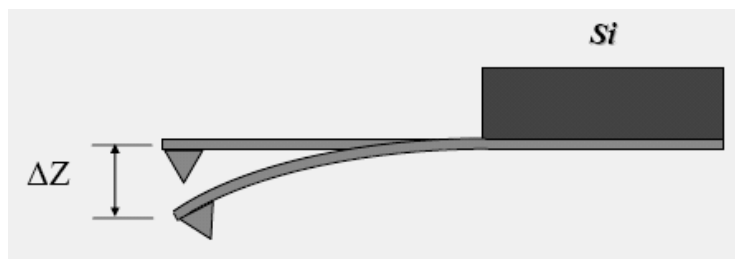


Рис. 5.11. Схематичне зображення зондового датчика АСМ [12]

Один кінець консолі жорстко закріплений на кремнієвій пластині - тримачі. На іншому кінці консолі розташовується власне зонд у вигляді гострої голки. Радіус заокруглення сучасних АСМ зондів складає 1 – 50 нм в залежності від типу зондів і технології їх виготовлення. Кут при вершині зонда приблизно 10 - 20°. Силу взаємодії зонда з поверхнею  $F$  можна оцінити таким чином:

$$F = k \cdot \Delta Z, \quad (5.22)$$

де  $k$  - жорсткість кантілівера;  $\Delta Z$  - величина, що характеризує його вигин.

Коефіцієнти жорсткості консолі  $k$  варіюються в діапазоні  $10^{-3}$  - 10 Н/м залежно від використаних при їх виготовленні матеріалів і геометричних розмірів. При роботі зондових АСМ датчиків у коливальних режимах важливі резонансні властивості пружної консолі.

Власні частоти вигинаючих коливань консолі прямокутного перерізу визначаються наступною формулою [12]:

$$\omega_{ri} = \frac{\lambda_i}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}}, \quad (5.23)$$

де  $l$  - довжина консолі;  $E$  - модуль Юнга;  $J$  - момент інерції перерізу консолі;  $\rho$  - густина матеріалу;  $S$  - площа поперечного перетину;  $\lambda_i$  - числовий коефіцієнт (в діапазоні 1-100), залежний від моди вигинаючих коливань.

Як видно з виразу (5.23), резонансна частота консолі визначається її геометричними розмірами і властивостями матеріалу. Частоти основних мод лежать в діапазоні 10-1000 кГц. Добротність консолі, в основному,

залежить від того середовища, у якому вона працює. Типові значення добротності при роботі у вакуумі складають  $10^3$  -  $10^4$ . На повітрі добротність знижується до 300 - 500, а в рідині падає до 10 - 100.

В атомно-силовій мікроскопії застосовуються, в основному, зондові датчики двох типів - з консоллю у вигляді балки прямокутного перерізу та з трикутною консоллю, утвореною двома балками. Загальний вид зондового датчика з консоллю у вигляді балки прямокутного перерізу представлений на рис.5.12.

На рис.5.13 показані електронно-мікроскопічні зображення зондових датчиків NSG11, випускаються серійно, з консоллю прямокутного перерізу (компанія "НТ-МДТ").

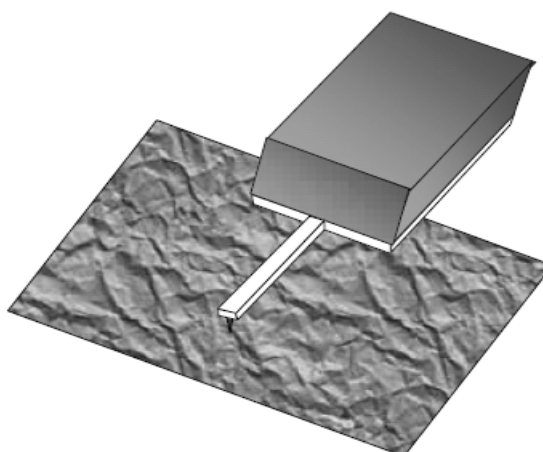


Рис. 5.12. Загальний вид зондового датчика з прямокутною консоллю [12]

Іноді зондові датчики АСМ мають декілька консолей різної довжини (а відповідно й різної жорсткості) на одній основі. В цьому випадку вибір робочої консолі здійснюється відповідним юстуванням оптичної системи атомно-силового мікроскопа.

Зондові датчики з трикутною консоллю мають при тих же розмірах більшу жорсткість і, отже, вищі резонансні частоти. Найчастіше вони застосовуються в коливальних АСМ методиках.

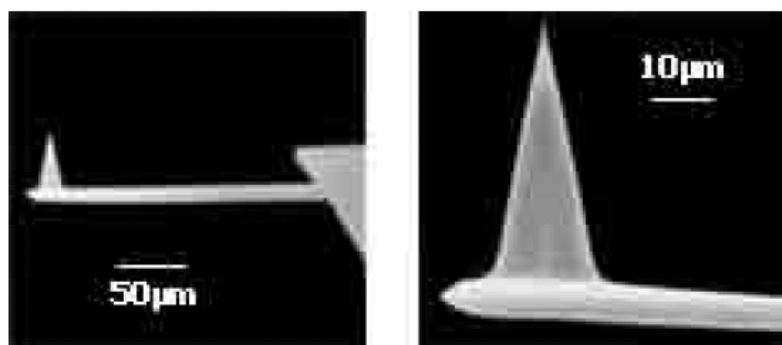


Рис. 5.13. Електронно-мікроскопічне зображення АСМ зонда, розташованого на прямокутній консолі

Загальний вигляд і габарити зондових датчиків з трикутною консоллю представлені на рис.5.14 і рис.5.15.

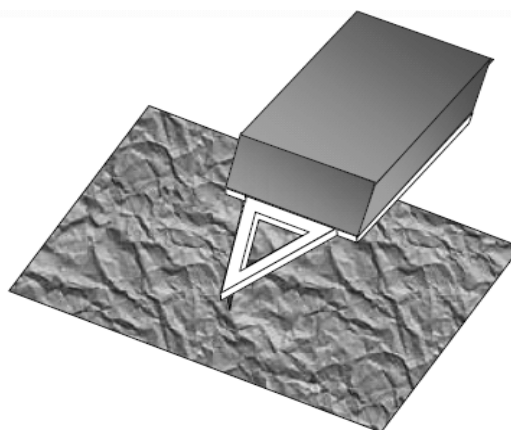


Рис.5.14. Загальний вид зондового датчика з трикутною консоллю [12]

Виготовлення зондових датчиків для АСМ є досить складним технологічним процесом, що включає операції фотолітографії, іонної імплантації, хімічного і плазмового травлення.

Перспективним є використання в якості зондових датчиків вуглецевих нанотрубок [16], що дозволяє підвищити роздільну здатність мікроскопу.

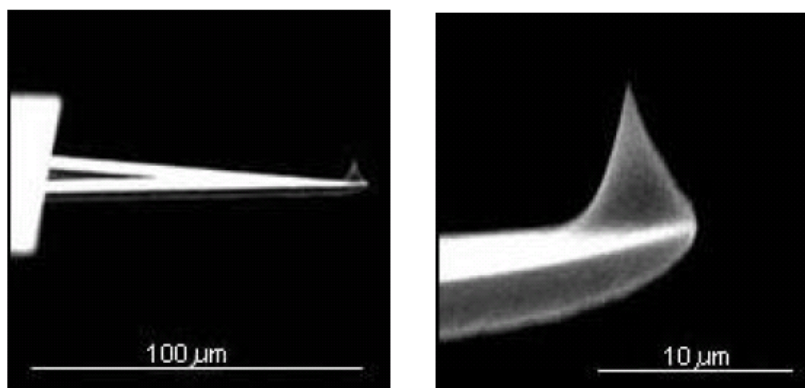


Рис. 5.15. Електронно-мікроскопічне зображення АСМ зонда, розташованого на трикутній консолі

### Контактна атомно-силова мікроскопія

Умовно методи отримання інформації про рельєф і властивості поверхні за допомогою АСМ можна розбити на дві великі групи: контактні квазістатичні і безконтактні коливальні.

У *контактних квазістатичних* методиках вістря зонда знаходиться в безпосередньому контакті з поверхнею, при цьому сили притягання і відштовхування, діючі з боку зразка, врівноважуються силою пружності консолі. При роботі АСМ в таких режимах використовуються консолі з відносно малими коефіцієнтами жорсткості, що дозволяє забезпечити високу чутливість і уникнути небажаної надмірної дії зонда на зразок.

У *квазістатичному* режимі АСМ зображення рельєфу досліджуваної поверхні формується або при постійній силі взаємодії зонда з поверхнею (сила притягання або відштовхування), або при постійній середній відстані між основою зондового датчика і поверхнею зразка. При скануванні зразка в режимі  $F_z = \text{const}$  система зворотного зв'язку підтримує постійною величину вигину консолі, а отже, і силу взаємодії зонда зі зразком (рис.5.16). При цьому керуюча напруга в петлі зворотного зв'язку, що

подається на  $Z$ -електрод сканера, буде пропорційна до рельєфу поверхні зразка.

При дослідженні зразків з малими (порядку одиниць ангстрем) перепадами висот рельєфу часто застосовується режим сканування при постійній середній відстані між основою зондового датчика і поверхнею ( $Z = const$ ). У цьому випадку зондовий датчик рухається на деякій середній висоті  $Z_{cp}$  над зразком (рис.4.33), при цьому в кожній точці реєструється вигин консолі  $\Delta Z$ , який пропорційний до сили, діючої на зонд з боку поверхні. АСМ зображення в цьому випадку характеризує просторовий розподіл сили взаємодії зонда з поверхнею.

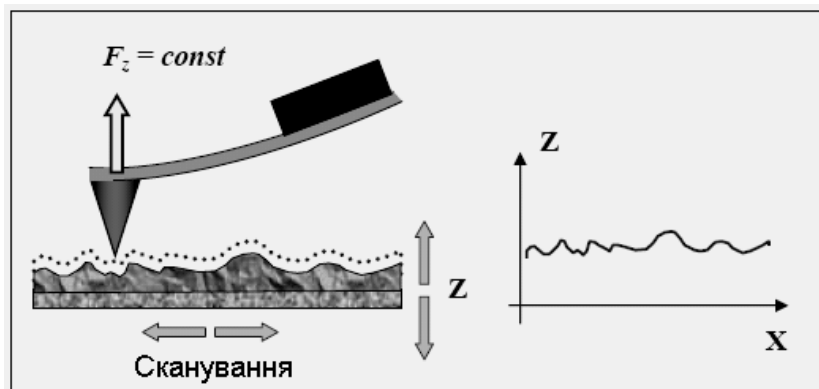


Рис. 5.16. Формування АСМ зображення при постійній силі взаємодії зонда зі зразком [12]

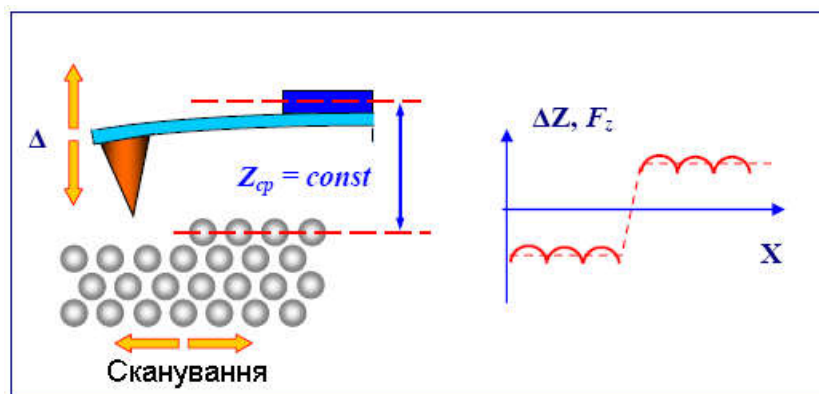


Рис. 5.17. Формування АСМ зображення при постійній відстані між зондовим датчиком і зразком [12]

Недолік контактних АСМ методик - безпосередня механічна взаємодія зонда з поверхнею. Це часто приводить до пошкодження зондів і руйнування поверхні зразків у процесі сканування. Крім того, контактні методики практично не придатні для дослідження зразків з малою механічною жорсткістю, наприклад структур на основі органічних матеріалів та біологічних об'єктів.

### Коливальні методики АСМ

Як вказувалося вище, недоліком контактних АСМ методик є безпосередня механічна взаємодія зонда з поверхнею. Контактні методики практично не придатні для дослідження зразків з низькою механічною твердістю. Для дослідження таких зразків застосовуються коливальні АСМ методики, засновані на реєстрації параметрів взаємодії консолі, яка коливається, з поверхнею. Дані методики дозволяють істотно зменшити механічну дію зонда на поверхню в процесі сканування. Крім того, розвиток коливальних методик суттєво розширив арсенал можливостей АСМ для вимірювання різних властивостей поверхні зразків.

### Вимушені коливання консолі

Точний опис коливань консолі зондового датчика АСМ являє собою складну математичну задачу. Проте основні риси процесів, що відбуваються при взаємодії консолі з поверхнею, можна зрозуміти на основі простих моделей, зокрема за допомогою моделі зосередженої маси [3]. Представимо консоль у вигляді пружної консолі (з жорсткістю  $k$ ) та з зосередженою масою  $m$  на одному кінці. Інший кінець консолі закріплений на п'єзовібраторі ПВ (рис.5.18).

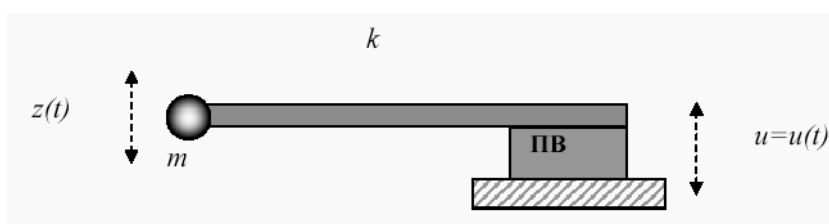


Рис. 5.18. Модель зондового датчика у вигляді пружної консолі

з масою на кінці [12]

Нехай п'єзовібратор виконує гармонічні коливання з частотою  $\omega$ :

$$u = u_0 \cos(\omega t) . \quad (5.24)$$

Тоді рівняння руху такої коливальної системи запишеться у вигляді

$$mz'' = -k(z - u) - \gamma z' + F_0 , \quad (5.25)$$

де член, пропорційний до першої похідної  $\gamma z'$ , враховує сили в'язкого тертя з боку повітря, а за допомогою  $F_0$  позначена сила тяжіння та інші можливі постійні сили. Як відомо, постійна сила лише зміщує положення рівноваги системи і не впливає на частоту, амплітуду і фазу коливань. Виконуючи заміну змінних (тобто розглядаючи коливання щодо нового стану рівноваги):

$$z = z + F_0 / k , \quad (5.26)$$

можна привести рівняння руху консолі до вигляду:

$$mz'' + \gamma z' + kz = ku_0 \cos(\omega t) . \quad (5.27)$$

Розділивши рівняння на  $m$  і ввівши параметр добротності системи  $Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma}$  та  $\omega_0$  - власну частоту консолі, одержуємо:

$$z'' + \frac{\omega_0}{Q} z' + \omega_0^2 z = \omega_0^2 u_0 \cos(\omega t) . \quad (5.28)$$

Найпростіше рішення даного рівняння шукається на комплексній площині. Для комплексної величини  $\eta$  маємо:

$$\eta'' + \frac{\omega_0}{Q} \eta' + \omega_0^2 \eta = \omega_0^2 u_0 e^{-i\omega t} . \quad (3.29)$$

Загальне рішення даного рівняння є суперпозицією затухаючих з декрементом  $\delta = \omega_0 / 2Q$  і незатухаючих вимушених коливань на частоті  $\omega$ . Знайдемо сталі коливання в такій системі. Шукаємо рішення у вигляді

$$\eta = a \cdot e^{-\omega t} . \quad (5.30)$$

Підставляючи (3.30) в рівняння (3.29), одержуємо для комплексної амплітуди  $a$ :



$$a = \omega_0^2 u_0 / \left( \omega_0^2 - \omega^2 - i \frac{\omega \omega_0}{Q} \right). \quad (5.31)$$

Модуль даного виразу рівний амплітуді вимушених коливань  $A(\omega)$ :

$$A(\omega) = \omega_0^2 u_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega^2 \omega_0^2}{Q^2}}. \quad (5.32)$$

Фаза комплексної амплітуди  $a$  співпадає з фазою коливань нашої системи  $\varphi(\omega)$ :

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\omega \omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right]. \quad (5.33)$$

З виразу (3.32) слідує, що амплітуда коливань зонда на частоті  $\omega_0$  визначається добротністю системи і рівна  $Q u_0$ . Крім того, наявність в системі дисипації приводить до зсуву резонансної частоти коливань консолі. Дійсно, виконуючи диференціювання підкореневого виразу по величині  $\omega^2$  у формулі (5.32) і прирівнюючи похідну до нуля, отримаємо для резонансної частоти дисипативної системи  $\omega_{rd}$ :

$$\omega_{rd}^2 = \omega_0^2 \left( 1 - \frac{1}{2Q^2} \right). \quad (5.34)$$

Тоді зсув резонансної частоти для дисипативної системи буде рівним

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{rd} = \omega_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \right). \quad (5.35)$$

Це призводить до того, що амплітудно-частотна характеристика системи зміщується в область низьких частот (рис.4.35).

Проте, як показують оцінки, для типових значень добротності консолі в повітряному середовищі величина зсуву резонансної частоти внаслідок дисипації мала. Вплив дисипації зводиться, в основному, до значного зменшення амплітуди коливань і розширенню **амплітудно-частотної** (АЧХ) і **фазо-частотної** (ФЧХ) характеристик системи (рис.5.19).

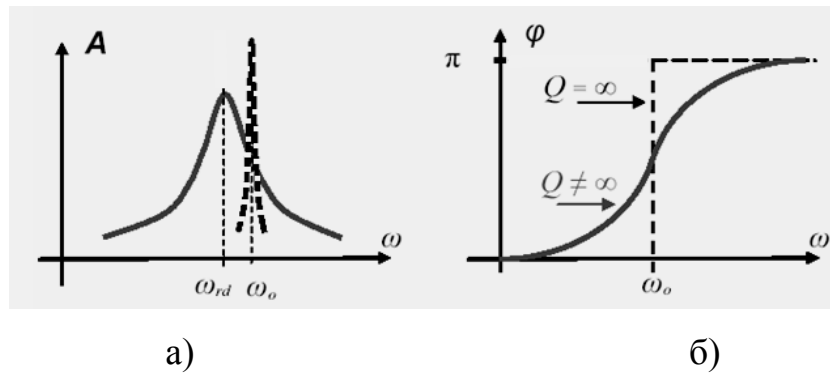


Рис. 5.19. Зміна АЧХ (а) і ФЧХ (б) в системі з дисипацією.

Пунктиром показані характеристики бездисипативної системи [12]

### Безконтактний режим коливань консолі АСМ

У безконтактному режимі консоль виконує вимушені коливання з малою амплітудою порядку 1 нм. При наближенні зонда до поверхні на консоль починає діяти додаткова сила з боку зразка  $F_{PS}$ . При ван-дер-ваальсовській взаємодії це відповідає області відстаней між зондом і зразком, де діє сила притягання. Якщо зонд АСМ знаходиться на відстані  $z_0$  від поверхні, то для малих коливань можна записати:

$$F_{PS} = F_{PS0} + \frac{\partial F}{\partial z}(z_0) \cdot z(t). \quad (5.36)$$

Це призводить до того, що в правій частині рівняння, що описує коливання в такій системі, з'являються додаткові доданки:

$$mz'' = -k(z - u) - \gamma z' + F_0 + F_{PS0} + F'_z z. \quad (5.37)$$

Вводячи нові змінні:  $z = z + (F_0 + F_{PS0})/k$ , приходимо до рівняння:

$$mz'' + \gamma z' + (k - F'_z) \cdot z = ku_0 \cos(\omega t). \quad (5.38)$$

Тобто наявність градієнта сил приводить до зміни ефективної жорсткості системи:

$$k_{ef} = k - F'_z. \quad (5.39)$$

Після стандартних перетворень рівняння записується в наступному вигляді:

$$z'' + \frac{\omega_0}{Q} z' + (\omega_0^2 - \frac{F'_z}{m}) \cdot z = \omega_0^2 u_0 \cos(\omega t). \quad (5.40)$$

Виконуючи обчислення, аналогічні обчисленням, проведеним для вільної консолі, одержуємо амплітудно-частотну характеристику системи:

$$A(\omega) = \frac{\omega_0^2 u_0}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'_z}{m}\right)^2 + \frac{\omega^2 \omega_0^2}{Q^2}}}. \quad (5.41)$$

Відповідно ФЧХ:

$$\varphi(\omega) = \arctg \left[ \frac{\omega \omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2 - F'_z/m)} \right]. \quad (5.42)$$

Таким чином, наявність градієнта сили взаємодії зонда з поверхнею зразка приводить до додаткового зсуву АЧХ і ФЧХ системи. Резонансна частота у присутності зовнішньої сили  $\omega_{rf}$  може бути представлена у вигляді

$$\omega_{rf}^2 = \omega_0^2 \left( 1 - \frac{1}{2Q^2} - \frac{F'_z}{k} \right) = \omega_{rd}^2 - \frac{E'_z}{m}. \quad (5.43)$$

Отже, додатковий зсув АЧХ рівний

$$\Delta\omega = \omega_{rd} - \omega_{rf} = \omega_{rd} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{F'_z}{m\omega_{rd}^2}} \right). \quad (5.44)$$

З виразу (3.42) також випливає, що наявність градієнта сили приводить до появи додаткового зсуву фази:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi(\omega_0) \cong \frac{QF'_z}{k}. \quad (5.45)$$

Зсув фаз визначається похідною  $\mathbf{z}$ -компоненти сили по координаті  $\mathbf{z}$ . Дана обставина використовується для отримання фазового контрасту в АСМ дослідженнях поверхні.

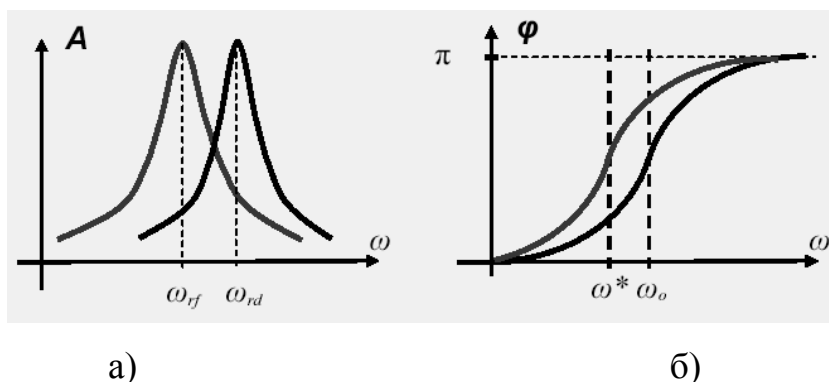


Рис. 5.20. Зміна АЧХ (а) і ФЧХ (б) консолі під дією градієнта сили [12]

### "Напівконтактний" режим коливань консолі АСМ

Реєстрація зміни амплітуди і фази коливань консолі в безконтактному режимі вимагає високої чутливості і стійкості роботи зворотного зв'язку. На практиці частіше використовується так званий "напівконтактний" режим коливань консолі (іноді його називають переривисто-контактний, а в іноземній літературі - "intermittent contact" або "tapping mode" режими). При роботі у цьому режимі збуджуються вимушені коливання консолі поблизу резонансу з амплітудою порядку 10 – 100 нм. Консоль підводиться до поверхні так, щоб в нижньому напівперіоді коливань відбувалося торкання поверхні зразка (це відповідає області відштовхування на графіку залежності сили від відстані) (рис.5.21).

При скануванні зразка реєструється зміна амплітуди і фази коливань консолі. Взаємодія консолі з поверхнею в "напівконтактному" режимі складається з ван-дер-ваальсовської взаємодії, до якої у момент торкання додається пружна сила, діюча на зонд зі сторони поверхні.

Теорія "напівконтактного" режиму значно складніше за теорію безконтактного режиму, оскільки в цьому випадку рівняння, що описує рух консолі, є суттєво нелінійним.

Проте характерні особливості даного режиму схожі з особливостями безконтактного режиму - амплітуда і фаза коливань консолі залежать від ступеня взаємодії поверхні і зонда в нижній точці коливань консолі.

Оскільки в нижній точці коливань зонд механічно взаємодіє з поверхнею, то на зміну амплітуди і фази коливань консолі в цьому режимі істотний вплив надає локальна жорсткість поверхні зразків.

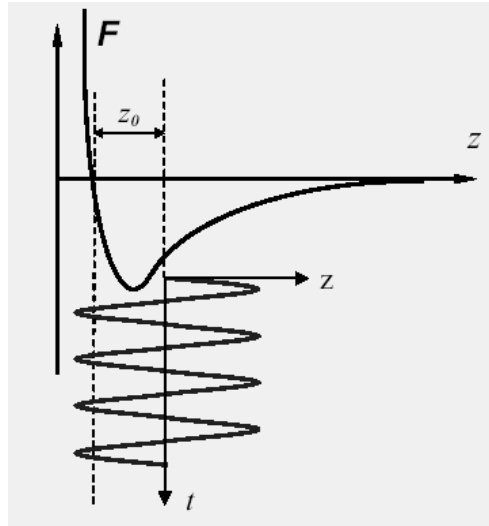


Рис. 5.21. Вибір робочої точки при "напівконтактному" режимі коливань консолі [12]

Зсув по фазі між коливаннями збуджуючого п'єзоелектричного вібратора і сталими (що встановилися) коливаннями консолі можна оцінити, якщо розглянути процес дисипації енергії при взаємодії зонда зі зразком [12]. При сталих коливаннях енергія, що поступає в систему, повністю дорівнює енергії, яка розсіюється системою.

Звідси для фазового зсуву отримується наступний вираз:

$$\sin \varphi = \frac{\omega A}{\omega_0 u_0} + \frac{QE_{PS}}{\pi k u_0 A}. \quad (5.46)$$

Таким чином, фазовий зсув коливань консолі в "напівконтактному" режимі визначається енергією дисипативної взаємодії зонда з поверхнею зразка.

Формування АСМ зображення поверхні в режимі коливань консолі відбувається таким чином. За допомогою п'єзовібратора збуджуються коливання консолі на частоті  $\omega$  (близької до резонансної частоти консолі) з амплітудою  $A_\omega$ . При скануванні система зворотного зв'язку АСМ

підтримує постійну амплітуду коливань консолі на рівні  $A_0$ , що задається оператором ( $A_0 < A_\omega$ ).

Напруга в петлі зворотного зв'язку (на z-електроді сканера) записується в пам'ять комп'ютера як АСМ зображення рельєфу поверхні. Одночасно при скануванні зразка в кожній точці реєструється зміна фази коливань консолі, яка записується у вигляді розподілу фазового контрасту.

На рис.5.22, як приклад, приведені АСМ зображення ділянки плівки поліетилену, одержані в "напівконтактному" режимі (амплітудний і фазовий контраст).

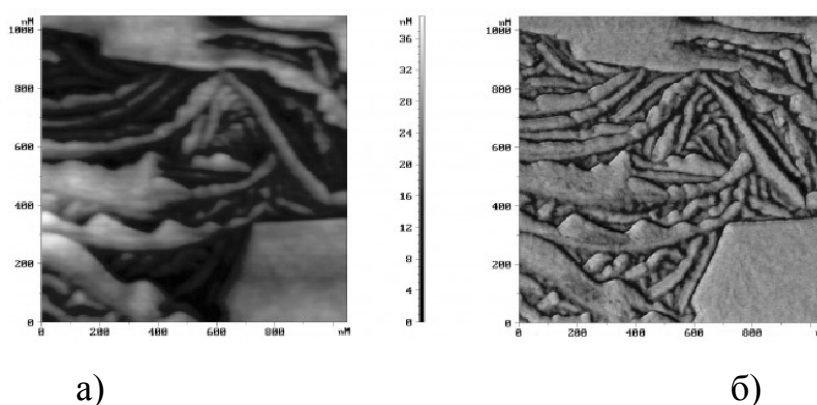


Рис. 5.22. АСМ зображення ділянки поверхні плівки поліетилену, одержані в "напівконтактному" ("tapping mode") режимі:

- а) рельєф поверхні, одержаний в режимі постійної амплітуди,  
 (б) - відповідний розподіл фазового контрасту

Хоча атомно-силовий мікроскоп теоретично може відобразити поверхню будь-якого зразка, проте практично розміри поверхні обмежуються: розмірами зонда та конструкцією сканера, швидкістю сканування, швидкодією та інформаційною ємністю електронних схем управління і обробки даних. Тому АСМ можна використовувати лише для дослідження практично гладких (від 0,005 нм до 5000 нм), плоских об'єктів із реєстрацією зображень розмірами від кількох нанометрів до  $100 \times 100$  мкм.

За допомогою АСМ можна досліджувати нанорозмірні об'єкти на поверхні, зокрема квантові точки (рис.5.23).

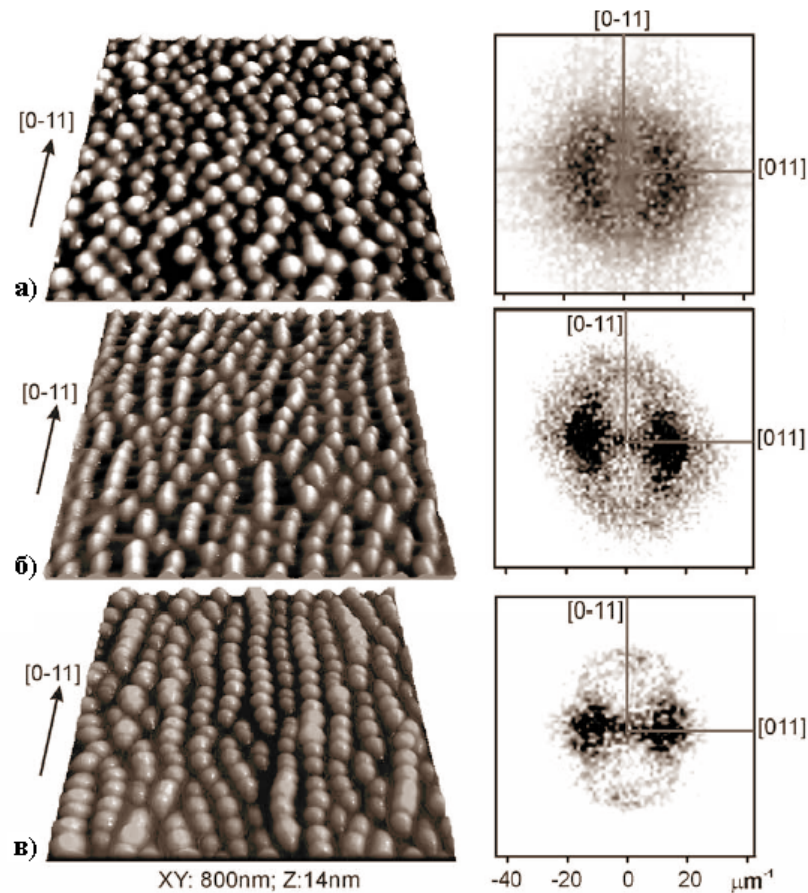


Рис.5.23. АСМ зображення фрагментів поверхні багатошарових  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}/\text{GaAs}$  структур (ліворуч) та їх 2D Фур'є перетворення (праворуч): а) – 2 періоди, б) – 7 періодів, в) 9 періодів

АСМ дозволяє вивчати вплив кількості періодів багатошарових структур, на основі яких вирощуються КТ, на властивості самих КТ. Зокрема встановлено, що при збільшенні кількості періодів структур відбувається поліпшення впорядкованості КТ у площині шару, що приводить до зменшення розмиття максимумів Фур'є перетворення (рис.5.23).

При формуванні КТ велику роль грає їх просторове (латеральне) впорядкування внаслідок пружної взаємодії зростаючих сусідніх КТ через перекриття їх деформаційних полів у підкладці. Розміщення КТ залежить

від кристалографічних напрямків шарів матеріалу, оскільки різні кристалографічні напрямки відрізняються за жорсткістю (модулем пружності) (рис.5.24).

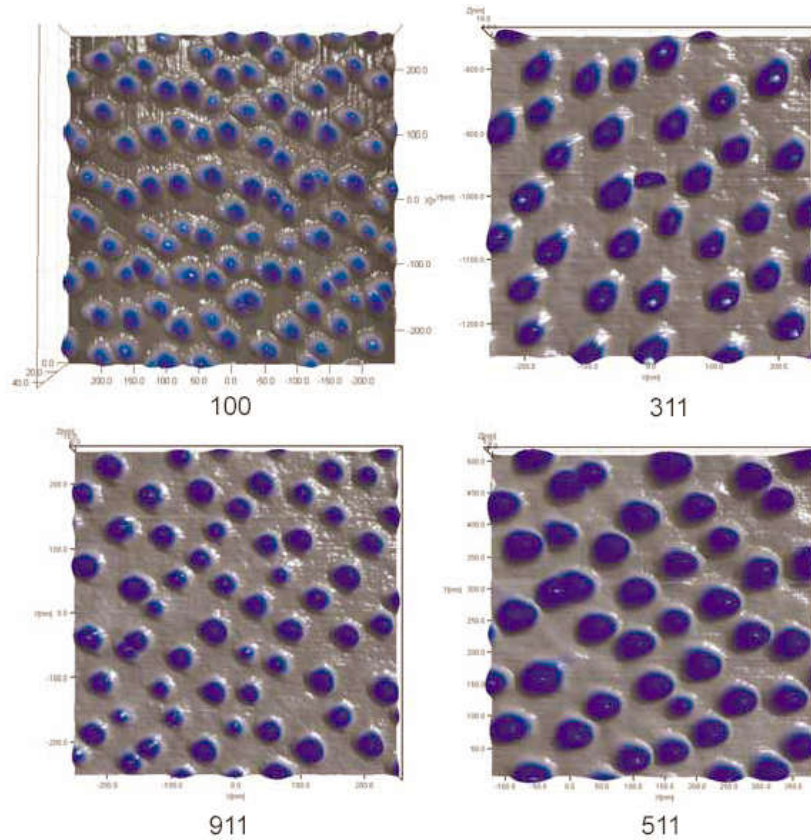


Рис.5.24. АСМ зображення фрагментів поверхонь двошарових структур  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ , вирощених на підкладках з різною орієнтацією

### 5.3. Електросилова мікроскопія

В електросиловій мікроскопії для отримання інформації про властивості поверхні використовується електрична взаємодія між зондом і зразком [12]. Розглянемо систему, що складається із зондового датчика, у якого зонд має провідне покриття, і зразка, що є тонким шаром матеріалу на струмопровідній підкладці (рис.5.25).



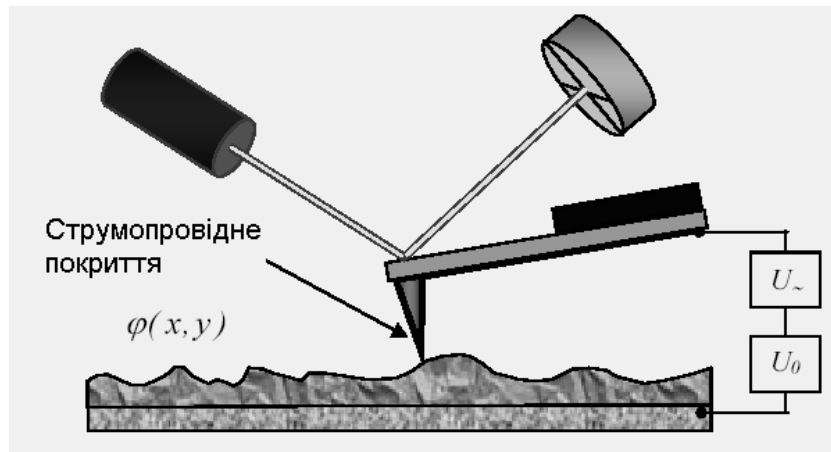


Рис. 5.25. Схема вимірювання електричної взаємодії зонда із зразком

Нехай між зондом і зразком подано постійну напругу  $U_0$  і змінну напругу  $U_{\sim} = U_1 \sin(\omega t)$ . Якщо тонкий шар на підкладці являє собою напівпровідник або діелектрик, то він може містити поверхневий заряд, отже на поверхні зразка існує розподіл потенціалу  $\varphi(x, y)$ . Напругу між зондом і поверхнею зразка можна представити у вигляді

$$U = U_0 + U_1 \sin(\omega t) - \varphi(x, y). \quad (5.47)$$

Система зонд - зразок володіє деякою електричною ємністю  $C$ , тому енергія такої системи може бути представлена в наступному вигляді:

$$E = \frac{CU^2}{2}. \quad (5.48)$$

Тоді електрична сила взаємодії зонда і зразка рівна

$$\vec{F} = -\text{grad}(E), \quad (5.49)$$

а її  $Z$ -компоненту можна представити у вигляді

$$F_z = \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (5.50)$$

Таким чином,  $Z$ -компонента електричної сили, діючої на зонд зі сторони зразка, рівна

$$F_z = - \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( U_0 - \varphi(x, y) \right)^2 + \frac{1}{2} U_1^2 \\ & + [U_0 - \varphi(x, y)] \cdot U_1 \sin(\omega t) - \frac{1}{4} U_1^2 \cos(2\omega t) \end{aligned} \right\} \cdot \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (5.51)$$

З останнього виразу виходить, що сила взаємодії має три складові:

постійну складову  $\rightarrow F_{z(\omega=0)} = -\left\{\frac{1}{2}\left(U_0 - \varphi(x, y)\right)^2 + \frac{1}{2}U_1^2\right\} \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$

складову на частоті  $\omega \rightarrow F_{z(\omega)} = -\{[U_0 - \varphi(x, y)] \cdot U_1 \sin(\omega t)\} \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$

складову на частоті  $2\omega \rightarrow F_{z(2\omega)} = -\left\{\frac{1}{4}U_1^2 \cos(2\omega t)\right\} \cdot \frac{\partial C}{\partial z}$

Детектування амплітуди коливань консолі на частоті  $2\omega$  дозволяє досліджувати розподіл вздовж поверхні величини  $C'_z(x, y)$  - похідної від ємності по координаті  $z$  (так звана мікроскопія ємності [17]). З допомогою цього методу можна вивчати локальні діелектричні властивості приповерхневих шарів зразків. Для отримання високої роздільної здатності в даній методиці необхідно, щоб електрична сила в системі зондовий датчик - зразок визначалася, в основному, взаємодією між зондом і поверхнею. Сила взаємодії зонда з поверхнею на основі простої моделі плоского конденсатора може бути представлена у вигляді

$$F_{PS} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial z} \cong -\frac{1}{2}\alpha U^2 \frac{\pi R^2}{h^2}. \quad (5.52)$$

де  $\alpha$  - постійна величина,  $R$  - характерний радіус закруглення кінчика зонда,  $h$  - відстань зонд-поверхня (або товщина плівки діелектрика на провідній підкладці). З другого боку сила, діюча на консоль зі сторони зразка:

$$F_{CS} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial z} \cong -\frac{1}{2}\alpha U^2 \frac{LW}{H^2}, \quad (5.53)$$

де  $\alpha$  - постійна величина,  $L$  - довжина консолі,  $W$  - ширина консолі,  $H$  - відстань до поверхні (визначається розмірами зонда). З умови  $F_{PS} > F_{CS}$  слідує:

$$h < \sqrt{\frac{\pi R^2 H^2}{LW}}. \quad (5.54)$$

Звідси для типових значень параметрів зондових датчиків ( $L \sim 100$  мкм,  $W \sim 30$  мкм,  $H \sim 30$  мкм,  $R \sim 10$  нм) можна одержати наступну оцінку:  $h < 10$  нм.

Оскільки сама величина  $\frac{\partial C}{\partial z}$  залежить від відстані зонд-зразок, для дослідження діелектричних властивостей зразків застосовується двохпрохідна методика. У кожному рядку сканування виконується наступна процедура. На першому проході за допомогою п'єзовібратора збуджуються коливання консолі на частоті, близькій до резонансної частоти  $\omega_0$ , і знімається АСМ зображення рельєфу в "напівконтактному" режимі. Потім зондовий датчик відводиться від поверхні на відстань  $z_0$ , між зондом і зразком подається змінна (на частоті  $\omega = \omega_0$ ) напруга, і здійснюється повторне сканування (рис.5.26). На другому проході датчик рухається над поверхнею по траєкторії, що повторює рельєф зразка. Оскільки в процесі сканування локальна відстань між зондовим датчиком і поверхнею в кожній точці постійна, зміни амплітуди коливань консолі на частоті  $2\omega$  будуть пов'язані зі зміною ємності системи зонд-зразок внаслідок зміни діелектричних властивостей зразка.

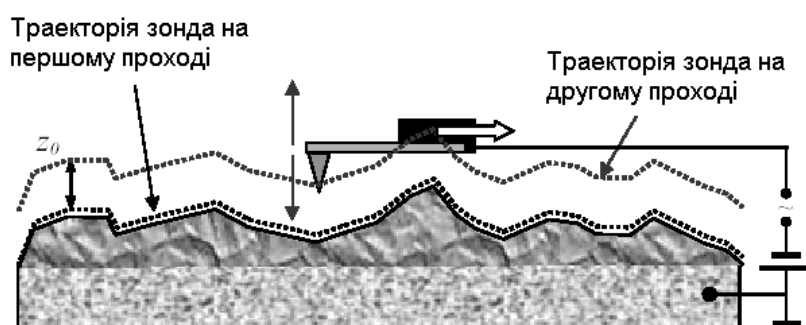


Рис. 5.26. Двопрохідна методика ЕСМ [12]

Таким чином, підсумковий ЕСМ кадр є двовимірною функцією  $C'_z(x,y)$ , яка характеризує локальні діелектричні властивості зразка.

Детектування сигналу на частоті  $\omega$  дозволяє вивчати розподіл поверхневого потенціалу  $\phi(x,y)$  (так званий метод Кельвіна [18]). Для цього при скануванні зразка на другому проході в кожній точці виконується наступна процедура. За допомогою джерела постійної напруги підбирається така величина  $U_0$ , щоб амплітуда коливань консолі на частоті  $\omega$  стала рівною нулю. Це відбувається в тому випадку, якщо

$U_0 = \varphi(x,y)$  у даній точці поверхні. На рис.5.27 як приклад приведені АСМ зображення рельєфу поверхні і розподіл поверхневого потенціалу для композитної плівки, що містить азобензол. На зображенні поверхневого потенціалу окремі виділяються молекули азобензола, що мають сильний дипольний момент.

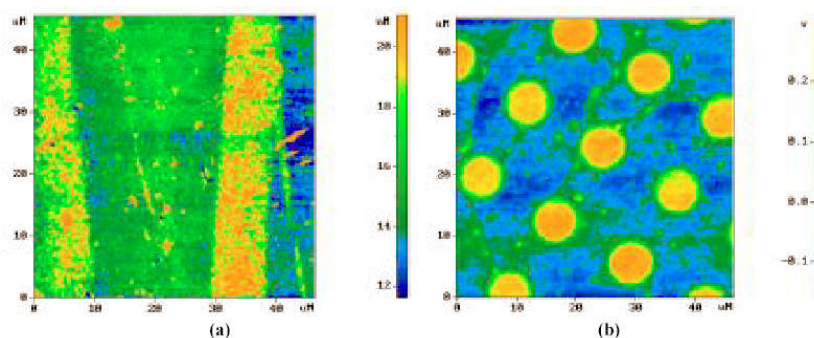


Рис. 5.27. Рельєф поверхні (а) і розподіл поверхневого потенціалу (б) плівки азобензолу [18]

#### 5.4. Морфологія тонких плівок РbТе вирощених на слюдяних підкладках.

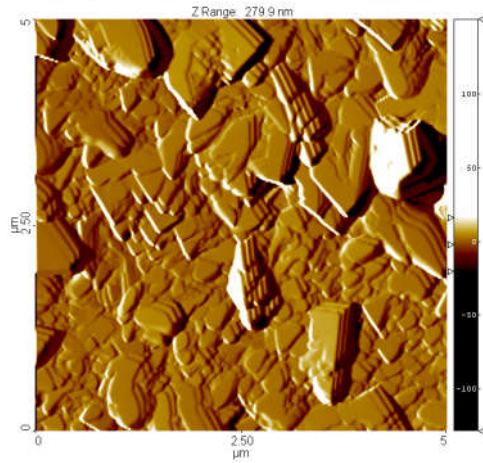
Плівки телуриду свинцю, що досліджувалися в даній роботі, вирощувалися методом гарячої стінки на підкладках із слюди при різних технологічних факторах, наведених в табл. 3.1.

№ п / п	Номер зразка	Час напилення, хв	$T_{\text{підк}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{вип}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	Тиск у колпаку, мм.рт.ст	Товщи на плівки, мкм	Швидкість напилення, мкм/хв	Шорсткість Нм
1	30-31	10	156	360	550	$6,8 \cdot 10^{-5}$	8,3	0,83	65,5
2	32-33	7	156	360	550	$6,1 \cdot 10^{-5}$	6,5	0,93	52,8
3	35-36	5	160	360	550	$6,0 \cdot 10^{-5}$	5,4	1,08	64,6
4	37-38	3	153	360	550	$5,9 \cdot 10^{-5}$	4,3	1,43	47,7
5	39-40	10	110	360	550	$5,6 \cdot 10^{-5}$	8,3	0,83	-
6	41-42	10	80 С	360	550	$5,5 \cdot 10^{-5}$	8,4	0,84	-
7	43-44	10	360	360	550	$5,4 \cdot 10^{-5}$	8,1	0,81	-
8	2-3	10	135	360	550	$4,0 \cdot 10^{-5}$	8,5	0,85	-

Поверхня плівок досліджувалася за допомогою атомно-силового мікроскопа Nanoscope IIIa Dimension™ 3000 SPM у центрі колективного користування приладів Інституту фізики напівпровідників НАН України. Вимірювання проводились в контактному режимі з використанням кремнієвого зонду, і охоплювали площадки розміром  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup>.

Якісний і кількісний аналіз поверхні зразків проводився з використанням програмного забезпечення !!\_Gwyddion\_1.8\_2005 та WSxM4\_0Develop4\_5. Отримані електронні картинки поверхонь для зразків з різними товщинами і вирощених при різних температурах зображено на рис. 3.1-3.4

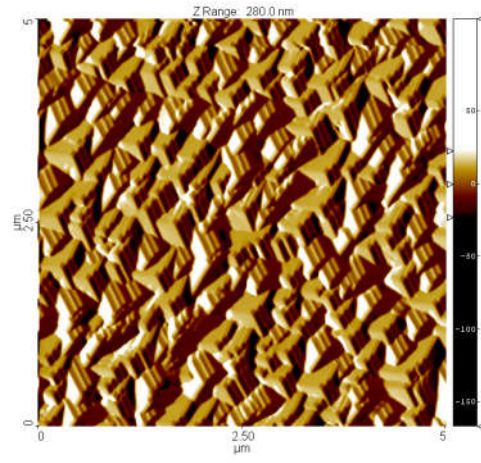
Iisch\_41-42.010.dth\_xgradient



а)

$T_{II}=80^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,4 мкм., час нап. 10 хв

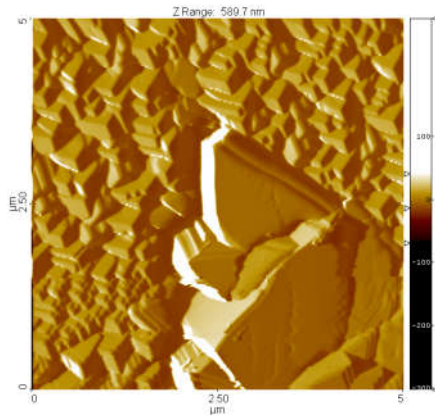
Iisch\_39-40.009.dth\_xgradient



б)

$T_{II}=110^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,3 мкм., час нап. 10 хв.

Iisch\_43-44.007.dth\_xgradient

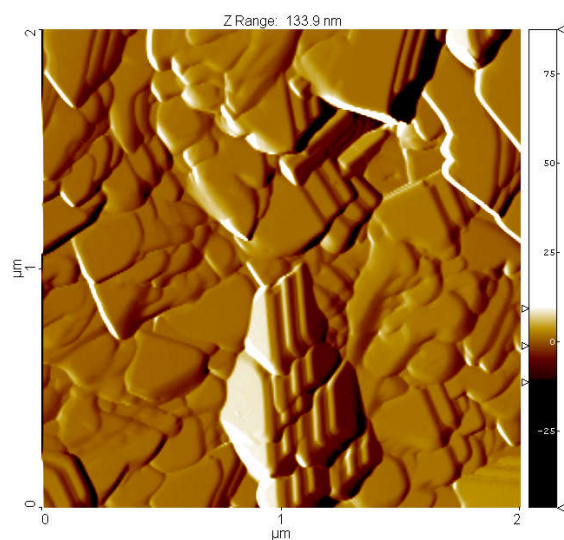


в)

$T_{II}=360^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,1 мкм., час пер. 10 хв.

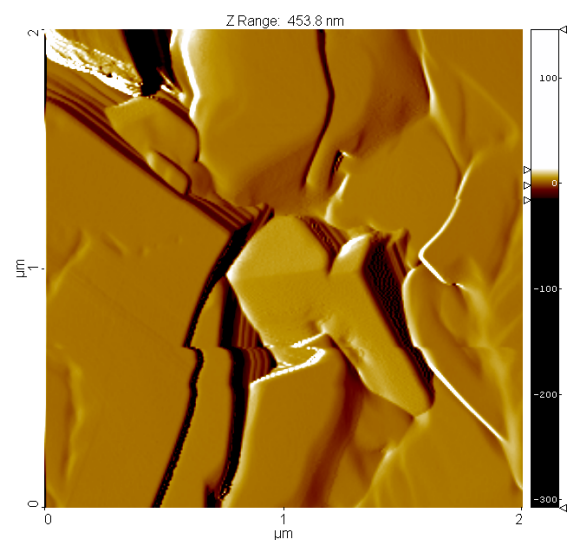
**Рис.3.1** Морфологія поверхні плівки РвТе/ слюда: а) зразок №41-42, б) зразок №39-40, в) зразок №43-44.

Iisch\_41-42.011.dth\_xgradient



а)

Iisch\_39-40.015.dth\_xgradient

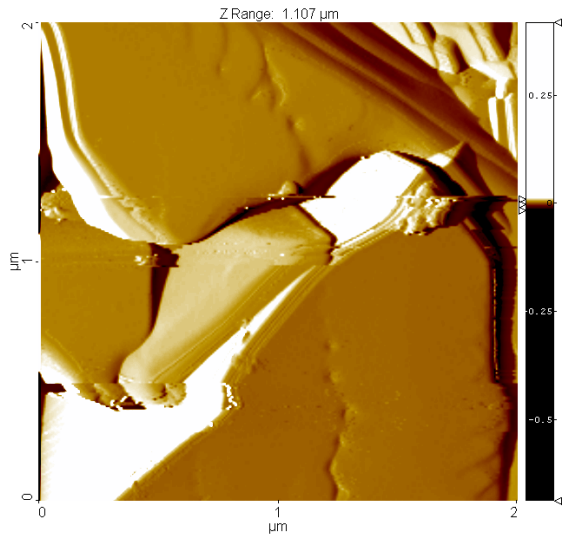


б)

$T_{II}=80^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,4 мкм., час нап. 10  
ХВ

$T_{II}=110^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,3мкм, час  
нап.10хв.

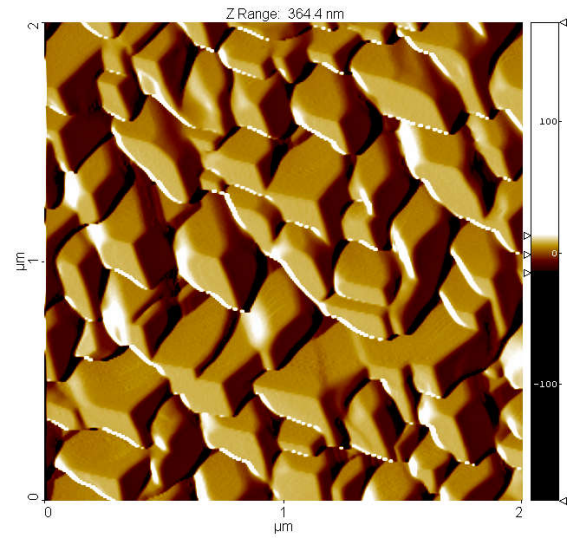
lisch\_43-44.005.dth\_xgradient



в)

$T_{II}=360^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,1мкм., час пер.10  
ХВ.

lisch\_2-3.018.uth\_xgradient

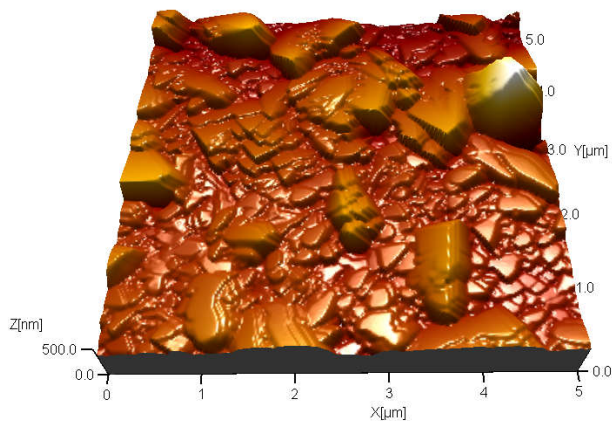


г)

$T_{II}=135^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,3мкм., час пер.10  
ХВ.

**Рис.3.2** Морфологія поверхні плівки PbTe/ слюда: а)зразок №41-42, б)зразок №39-40, в)зразок №43-44, г)зразок №2-3

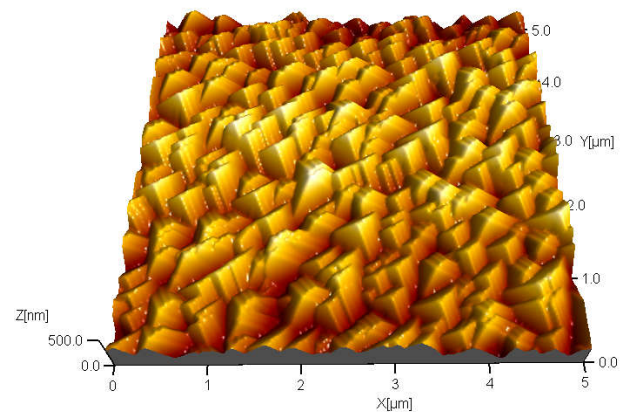
12.010.dth



а)

$T_{II}=80^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,4 мкм., час нап.  
10 хв

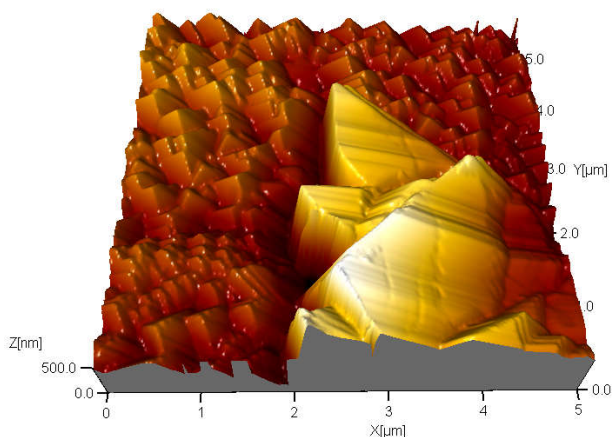
1.008.dth



б)

$T_{II}=110^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,3мкм, час  
нап.10хв.

4.007.dth

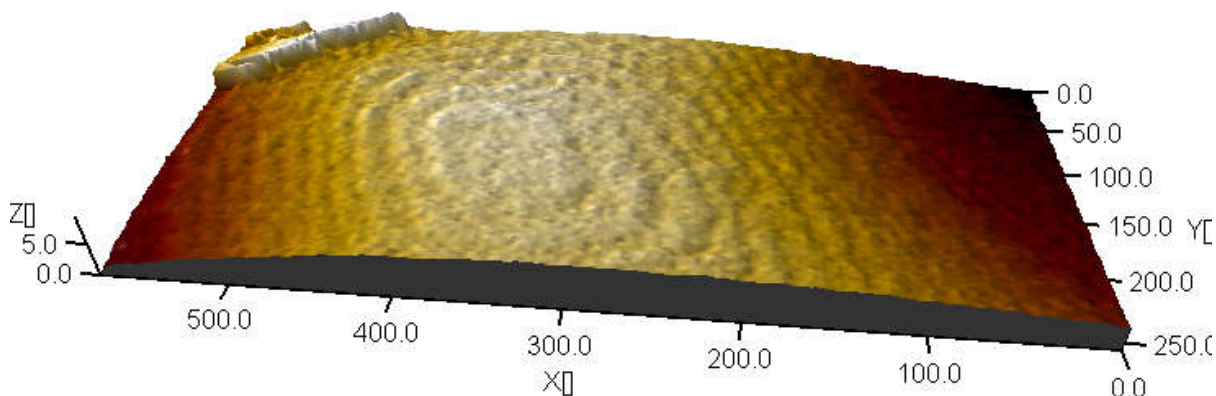


в)

$T_{II}=360^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,1мкм., час пер.10  
хв.

**Рис.3.3** Морфологія поверхні плівки PbTe/ слюда: а) зразок №41-42, б) зразок №39-40, в) зразок №43-44.

В одному із зразків виявлено ступені росту рис.3.4. За допомогою програмного забезпечення розраховано висоту — 0,35 нм і плато — 13,8 нм сходинок на зразку товщиною 4,3 мкм, вирощеного при температурі  $153^{\circ}\text{C}$ .

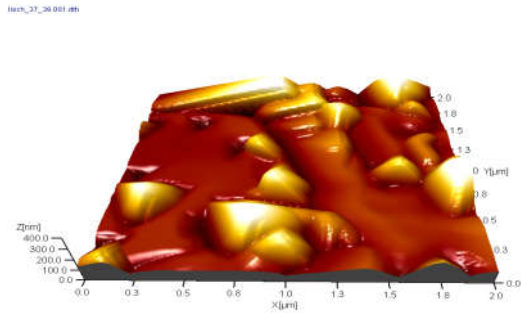


**Рис 3.4** Вигляд ступеней росту PbTe отриманий за допомогою атомно-силового мікроскопа

Проаналізовано середньо-квадратичну шорсткість поверхні плівок вирощених при різних технологічних факторах

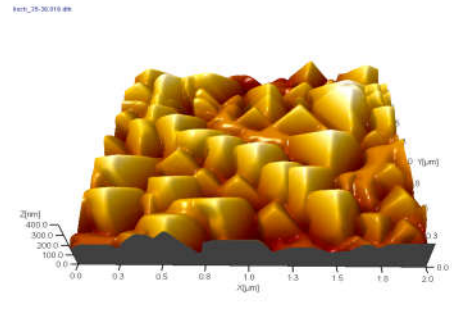


На рис. 3.5 наведено вигляд поверхонь для зразків з різною шорсткістю.



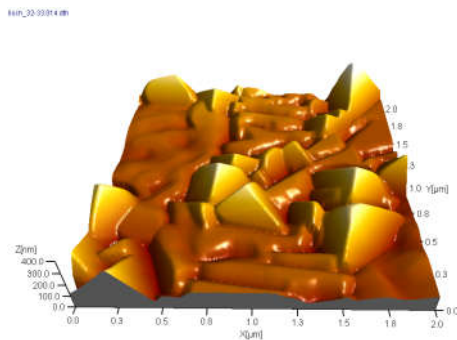
а)

$T_{II}=153^{\circ}\text{C}$ , товщина 4,3 мкм, час пер.3 хв. шорсткість 47,7 нм



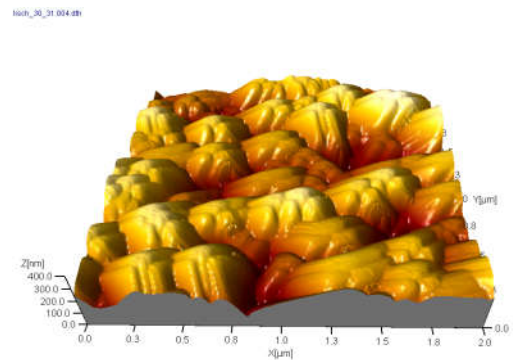
б)

$T_{II}=160^{\circ}\text{C}$ , товщина 5,4 мкм., час пер.5 хв. шорсткість 64,6 нм



в)

$T_{II}=156^{\circ}\text{C}$ , товщина 6,5 мкм, час пер.7 хв. шорсткість 52,8 нм



г)

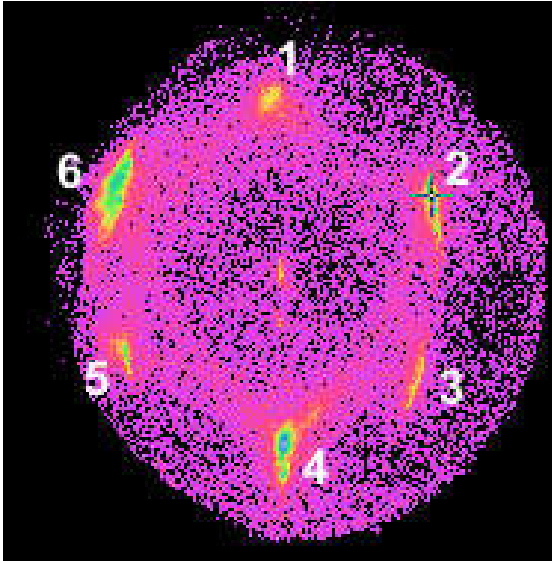
$T_{II}=156^{\circ}\text{C}$ , товщина 8,3 мкм, час пер.10 хв. шорсткість 65,5 нм

**Рис.3.5.**Вигляд поверхонь зразків РbТе/слюда з різною шорсткістю: а) зразок № 37-38, б) зразок № 35-36, в) зразок № 32-33, г) зразок №30-31.

Шорсткість поверхні (RMS) Sq

80С	33нм
110С	49нм
360С	86нм

Проведено аналіз огранки пірамід (тобто кутів нахилу граней) у вигляді яких росте телурид свинцю на підкладках зі слюди (рис 3.6).



**Рис 3.6.** Аналіз огранки пірамід PbTe/міса (кути нахилу граней) температура підкладки 160°C, товщина 5,4 мкм.

1 – 91; 52,4

2 – 26,11; 50,3

3 - -37,27; 51,25

4 - -90; 51,44

5 - -153,43; 51,57

6 – 150,59; 56,38

**Кут між площ. 111 та 100 в PbTe 54.7 градуси.**

З аналізу огранки слідує, що орієнтація кристалітів {111}.

## ВИСНОВКИ

1. В роботі узагальнено та систематизовано методи діагностики поверхні твердого тіла.

2. Виконано огляд сучасних методів діагностики поверхні, які поділено на емісійні, мікрозондові та методи розсіювання мікрочастинок. Приведено класифікацію методів за їх фізичним принципом.

3. Розглянуто методи скануючої зондової мікроскопії, а саме скануючу тунельну і атомно-силову мікроскопію, електросилову та магніто-силову мікроскопію, а також ближньопольову оптичну мікроскопію.

### Список використаних джерел

1. Фодчук І.М., Баловсяк С.В. Діагностика поверхні твердого тіла. Загальний стан проблеми та X-променеві методи:– Чернівці: Рута, 2007. – 276 с.
2. Нефедов В.И., Черепин В.Г. Физические методы исследования поверхности твердых тел. – М.: Наука, 1983. – 295 с.
3. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 333 с.
4. Черепин В.Г., Васильев М.А. Справочник. Методы и приборы для анализа поверхности материалов. – К.: Наукова думка, 1982. – 396 с.
5. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. - Л.: Машиностроение, 1988. – 184 с.
6. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy // Phys. Rev. Lett. – 1982. – V.49, No.1. – P.57-60.
7. Бухараев А.А., Овчинников Д.В., Бухараева А.А. Диагностика поверхности помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1997. – Т.63, № 5. – С.10-27.
8. Литвин О.С., Прокопенко І.В. Вивчення морфології поверхні полікристалічних плівок методом атомно-силової мікроскопії // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка. – 2001. – Вип. 112. – С.5-10.
9. McKay H.A., Feenstra R.M., Schmidting T., Pohl U.W. Arrangement of nitrogen atoms in GaAsN alloys determined by scanning tunneling microscopy // Applied Physics Letters. – 2001. – V.78, No.1. – P.82-84.
10. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и нанoeлектроники. Часть I // Микроэлектроника. – 1999. – Т.28, №6. – С.405-414.
11. Goto K., Hane K., Tapping mode capacitance microscopy // Rev. Sci. Instrum. – 1997. – V.68, No.1. – P.120-122.

12. Д.М.Фреїк, І.М.Ліщинський, П.М.Литвин, В.В.Бачук, М.Я.Гриджук, Р.І.Никируй. Топологія поверхні і процеси росту нанокристалічних структур РbТе на сколах слюди-мусковіт// Фізика і хімія твердого тіла. 9, 4, сс. 529-535 (2008)63.
12. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. - Нижний Новгород: Изд-во института физики микроструктур, 2004. – 114 с.
13. Дряхлушин В.Ф., Климов А.Ю., Рогов В.В., Гусев С.А. Зонд сканирующего ближнепольного оптического микроскопа // Приборы и техника эксперимента. – 1998. - №2. - С.138-139.
14. Эдельман В.С. Сканирующая туннельная микроскопия // Приборы и техника эксперимента. – 1989. - № 5. - С.25 – 49.
15. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. – М.: Наука, 1976. – 664 с.
16. Simons J.G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film // J. Appl. Phys. – 1963. – V.34. – P.1793.
16. Дедков Г.В. Фуллерены как изображающие элементы иглы атомно-силового микроскопа // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т.23, №12. – С.37-43.
17. Matey J.R., Blanc J. Scanning capacitance microscopy // J. Appl. Phys. – 1985. - V.57, No.5. - P.1437 – 1444.
18. Stiller B., Karageorgiev P. Scanning Kelvin microscopy as a tool for visualization of optically induced molecular switching in azobenzene self assembling films // Surf. Interface Anal. – 2000. – V.30. – P.549-551.
19. Pohl D.W., Denk W., Lanz M. Optical spectroscopy: image recording with resolution  $\lambda/20$  // Appl. Phys. Lett. – 1984. - V.44. - P.651 – 653.
21. Интернет-сайт компанії "НТ-МДТ": <http://www.ntmdt.ru/>.
22. Туннельные явления в твердых телах / Под ред. Э.Бурнштейна и С.Лундквиста. – М.: Мир, 1973. - 422 с.
23. Неволин В.К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии: Учебное пособие. – М.: МГИЭТ, 1996. - 91 с.