

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіoeлектроніки
Факультет радіoeлектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра мікро- та нанoeлектроніки
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

бакалавр
(ступінь вищої освіти)

на тему Метрологічні характеристики сканувального тунельного мікроскопа

Виконав: студент(ка) IV курсу, групи РТЗ-417

Спеціальності 152 Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Метрологічне забезпечення якості продукції
Угир А.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник Курбацький В.П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Кокотіна В.В.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет радіоелектроніки і телекомунікацій
 Кафедра мікро- та наноелектроніки
 Ступінь вищої освіти бакалавр
 Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Метрологічне забезпечення якості продукції
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МНЕ
Сніжної Г.В.
 « » 20 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Уширя Андрія Петровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Метрологічні характеристики сканувального тунельного мікроскопа

керівник проекту (роботи) Курбацький Валерій Петрович, к. ф.-м. наук, доцент,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» травня 2021 року № 188

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 25.05.21

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Виявити чинники, які обмежують розділення СТМ у нормальному і повздовжньому напрямку відносно поверхні зразка; зробити оцінки граничної роздільної здатності СТМ в обох напрямках.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Застосування, принципи роботи і конструкція СТМ; методи нейтралізації впливу вібрацій, акустичних завад, перепадів температури; розрахунки граничної роздільної здатності.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада	Підпис, дата
--------	------------------------------	--------------

		завдання видав	прийняв виконане завдання
1, 2	Курбацький В.П., доцент каф. МІНЕ		
Нормоконтроль	Коротун А.В., доцент каф. МІНЕ		

7. Дата видачі завдання « 26 » квітня 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Систематизація літературних даних	26.04 – 04.05	
2	Складання і затвердження наукового завдання	05.05 – 06.05	
3	Проведення розрахунків	07.05 – 20.05	
4	Оформлення пояснювальної записки	21.05 – 25.05	

Студент(ка) _____ Упир А. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Курбацький В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка: 29 стор., 9 рис., 12 джерел.

Об'єкт дослідження – сканувальний тунельний мікроскоп.

Мета роботи – дослідження факторів, які впливають на якість зображення сканувального тунельного мікроскопа, та засобів їх усунення, зокрема, шумів у системі зонд – поверхня зразка, і розрахунок граничної роздільної здатності СТМ у нормальному та повздовжньому відносно поверхні зразка напрямках.

Описано призначення, область застосування, принципи роботи та будову сканувального тунельного мікроскопа (СТМ). Розглянуто негативні фактори, що впливають на якість зображення СТМ – вібрації, акустичні завади, термодрейф – та методи їх усунення або нейтралізації. Виконано розрахунки граничної роздільної здатності СТМ у нормальному та повздовжньому відносно поверхні зразка напрямках.

**ЗОНДОВА МІКРОСКОПІЯ, СКАНУВАЛЬНИЙ ТУНЕЛЬНИЙ МІКРОСКОП,
ТУНЕЛЬНИЙ ЕФЕКТ, ЗАВАДИ, ШУМИ, РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 СКАНУВАЛЬНИЙ ТУНЕЛЬНИЙ МІКРОСКОП ТА ПРИНЦИПИ ЙОГО РОБОТИ.....	10
1.1 Явище тунелювання електронів крізь потенціальний бар'єр	10
1.2 Будова сканувального тунельного мікроскопа.....	13
2 ФАКТОРИ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ СТМ, І РОЗРАХУНОК ГРАНИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ.....	20
2.1 Усунення шкідливих факторів, що впливають на якість зображення.....	20
2.2 Розрахунок граничної роздільної здатності СТМ.....	23
ВИСНОВКИ.....	28
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	29

ВСТУП

Сканувальна зондова мікроскопія і, зокрема, сканувальна тунельна мікроскопія (СТМ), – потужний сучасний метод дослідження морфології і локальних властивостей поверхневих шарів твердого тіла з високим просторовим розділенням. За останні десятиліття сканувальна тунельна мікроскопія перетворилася з рідкісної методики, доступної лише обмеженому числу груп дослідників, в широко застосовний інструмент для вивчення властивостей поверхні. Зараз практично жодне дослідження в області фізики поверхні або тонких плівок не обходиться без використання методів сканувальної зондової мікроскопії. СТМ є основою для нанотехнологій – технологій створення структур нанометрових масштабів [1-3].

Сканувальний тунельний мікроскоп (СТМ, STM) являє собою інструмент для візуалізації поверхні на атомному рівні. Він був створений Г. Біннігом і Г. Рорером в 1981 році [4,5], а у 1986 році його винахідники отримали за це Нобелівську премію з фізики.

Якщо для сканувального електронного мікроскопу хорошим розділенням вважається 1,0 - 0,5 нм, то розділення СТМ становить 0,01 нм. Таке розділення дозволяє отримувати зображення окремих атомів і управляти ними. СТМ працює в надвисокому вакуумі, повітрі, воді, різних інших рідинах або газах з температурою в межах від майже 0 К до більш ніж 1500 К.

Робота СТМ базується на законах квантового тунелювання. За принципом дії сканувальний тунельний мікроскоп суттєво відрізняється від інших типів зондових мікроскопів – атомно-силового або ближньопольового оптичного. В якості зонда для обстеження поверхні зразка використовується металеве вістря, поєднане з електромеханічним приводом. Коли вістря наближається до поверхні на відстань, меншу за 1 нм, за умови прикладення до проміжку між ними невеликої напруги $0,01 \div 10$ В в проміжку виникає тунельний струм силою порядку 1 нА.

У перших же експериментах з дослідження поверхні золота Au (100) було з'ясовано, що розрізняються надструктури і сходинки моноатомної висоти. Це свідчило про розділення сканувального тунельного мікроскопа порядку декількох десятих нанометра, хоча очікуваним було розділення у площині спостереження, яке не перевищує 4,5 нм.

Переваги СТМ наступні:

- тунельний мікроскоп не має лінз, тому зображення не викривлюється через аберації;
- енергія електронів не більше кількох еВ (менша за типову енергію хімічного зв'язку), що робить можливим неруйнівне обстеження об'єкта, в той час як в електронній мікроскопії високого розділення енергія досягає декількох кеВ і спостерігається утворення радіаційних дефектів.

Області застосування СТМ різноманітні.

1. Фізика і хімія поверхні.

За допомогою сканувальної тунельної мікроскопії вдалося здійснити реконструкцію атомної будови поверхні різних матеріалів. СТМ дозволяє отримувати спектри електронних станів з атомним розділенням і визначати хімічний склад поверхневого шару.

2. Нанометрія.

За допомогою СТМ можливо проводити дослідження шорсткості поверхні зразка з нанометровим розділенням.

3. Нанотехнології.

СТМ дозволяє здійснювати дослідження, виготовлення і контроль структур в наноелектроніці.

На основі СТМ, зокрема, можливі запис і відтворення інформації. При запису застосовують ефект локального впливу зонда на поверхню носія інформації. Цей вплив може здійснюватися механічно, створюючи на поверхні штучний рельєф у вигляді ямок, які представляють один біт пам'яті. Штучний

рельєф може створюватися також шляхом термодесорбції. В такому випадку зонд виступає в ролі носія матеріалу для створення бітів інформації. Зонд може бути використаний в ролі точкового джерела електронів для здійснення електронної літографії, структурних або хімічних локальних перебудов поверхні.

При запису інформації методом електронної літографії (нанолітографії) через зонд пропускають короткочасно великий тунельний струм при підвищеній різності потенціалів. Відбувається емісія електронів з вістря на поверхню об'єкта або навпаки, в результаті чого на поверхні утворюються поглиблення, які і несуть біт інформації. Щільність запису доходить до 10^{12} біт / см^2 .

4. Дослідження біологічних об'єктів – макромолекул (в тому числі молекул ДНК), вірусів та інших біологічних структур.

5. Матеріалознавство.

СТМ має перспективи в галузі матеріалознавства – при вивченні мікро- і субструктур різних матеріалів. Об'єктами для дослідження на СТМ можуть служити мікрошліфи. Рельєф мікрошліфа, одержуваний після травлення, відображає структуру матеріалу. Дослідження рельєфу за допомогою СТМ з високою роздільною здатністю дозволить виявити особливості, перш за все, субструктурної будови. Метод сканувальної тунельної мікроскопії відкриває широкі можливості для дослідження дефектів кристалічної будови (вакансій, дислокацій), різних сегрегацій атомів, в тому числі при фазових перетвореннях, особливо на їх ранніх стадіях. Визначення, крім структури матеріалу, хімічного складу локальних зон поверхні об'єкта (СТМ-спектроскопія) дозволяє конкурувати з растровою електронною мікроскопією та мікрорентгеноструктурним аналізом, перевершуючи його за рівнем розділення.

Метою роботи є дослідження факторів, які впливають на якість зображення сканувального тунельного мікроскопа, та засобів їх усунення, зокрема, шумів у системі зонд – поверхня зразка, і розрахунок граничної

роздільної здатності СТМ у нормальному та повздовжньому відносно поверхні зразка напрямках.

1 СКАНУВАЛЬНИЙ ТУНЕЛЬНИЙ МІКРОСКОП ТА ПРИНЦИПИ ЙОГО РОБОТИ

1.1 Явище тунелювання електронів крізь потенціальний бар'єр

За своєю природою електрон має як хвильові, так і корпускулярні властивості. Його поведінка описується за допомогою хвильової функції – розв'язку рівняння Шредингера. Квадрат модуля хвильової функції характеризує густину ймовірності виявлення електрона в околі даної точки простору.

Розрахунки показують, що хвильові функції електронів в атомі відмінні від нуля за межами сфери, яка відповідає ефективному перетину атома. Тому при зближенні атомів хвильові функції електронів перекриваються до того, як починає істотно позначатися дія міжатомних сил відштовхування. З'являється можливість переходу електронів від одного атома до іншого. Таким же чином здійснюється обмін електронами між двома тілами, що зближують без дотику, тобто без механічного контакту. Явище переходу електронів від одного тіла до іншого в подібних умовах називають тунельним ефектом (тунелюванням).

Принцип роботи СТМ базується на явищі тунелювання електронів крізь потенціальний бар'єр між зондом і зразком в прикладеному електричному полі.

Під час наближення зонда до поверхні зразка на відстань в декілька десятих нанометра утворюється тунельно-прозорий потенціальний бар'єр, висота якого залежить в першу чергу від значення роботи виходу електронів з матеріалів зонда і зразка. При спрощеному розгляді можна прийняти, що бар'єр є прямокутним і має ефективну висоту, яка дорівнює середньому значенню роботи виходу.

Ймовірність тунельного переходу електрона через одновимірний бар'єр прямокутної форми визначається співвідношенням [6]:

$$D = \frac{|A_2|^2}{|A_1|^2} = \exp(-\kappa a), \quad (1.1)$$

де A_1 – амплітуда хвильової функції електрона перед бар'єром; A_2 – амплітуда хвильової функції електрона після тунелювання через бар'єр; κ – константа загасання хвильової функції в області потенціального бар'єру; a – ширина бар'єру. Константа загасання визначається за формулою

$$\kappa = \frac{\sqrt{2mU_0}}{\hbar}, \quad (1.2)$$

де m – маса електрона, $\hbar$ – стала Планка. Коли між зондом і зразком створюють різницю потенціалів V , спостерігається тунельний струм.

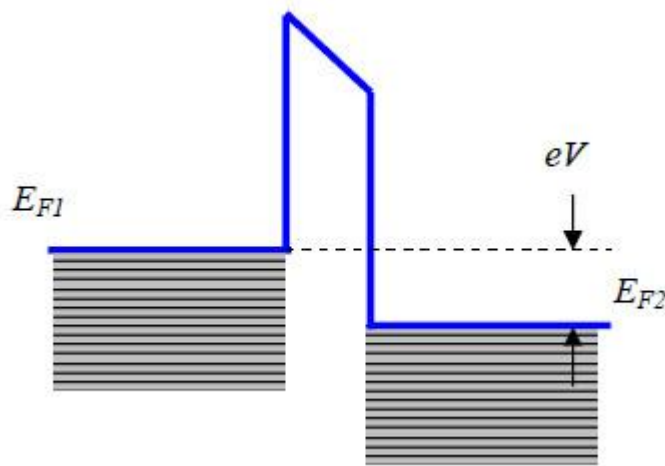


Рисунок 1.1 – Енергетична діаграма тунельного переходу між двома металами

Для появи тунельного струму необхідно виконання двох умов:

- 1) в зонді повинні бути вільні електрони (електрони провідності), а в зразку – незаповнені електронні рівні, куди могли б перейти ці електрони;
- 2) між зондом і зразком потрібно прикласти різницю потенціалів, причому її величина незрівнянно менша в порівнянні з тією, що потрібна для отримання електричного розряду при пробі діелектричного зазору між зондом і зразком (рис. 1.1).

В процесі тунелювання приймають участь електрони, які мають значення енергії в околі рівня Фермі E_F . Для випадку одновимірного контакту двох металів густина тунельного струму була розрахована в роботах [7,8]:

$$j = j_0 \left(U_0 \exp(-A\sqrt{U_0}a) - (U_0 + eV) \exp(-A\sqrt{U_0 + eV}a) \right), \quad (1.3)$$

де величини j_0 і A визначаються за формулами

$$j_0 = \frac{e}{4\pi^2 \hbar a^2}, \quad A = \frac{2\sqrt{2m}}{\hbar}. \quad (1.4)$$

За умови малої напруги зміщення ($eV \ll U_0$) вираз для густини струму можна представити у більш простому вигляді:

$$j = j_0 \frac{A\sqrt{U_0}eVa}{2} \exp(-A\sqrt{U_0}a). \quad (1.5)$$

Оскільки експоненціальна залежність від відстані дуже сильна у порівнянні з лінійною, то для якісного розгляду і оцінок використовують спрощену формулу

$$j = j_0(V) \exp\left(-\frac{2\sqrt{2mU_0}a}{\hbar}\right), \quad (1.6)$$

в якій величина $j_0(V)$ не залежить від відстані між зондом і зразком. Для типового значення роботи виходу 5 еВ величина константи загасання складає $1.2 \text{ \AA}^{-1}$, тому коли ширина проміжку змінюється на один ангстрем, густина тунельного струму змінюється майже на порядок. Хоча реальний тунельний перехід в СТМ не є одновимірним і характеризується більш складною геометрією, проте основна риса тунелювання – експоненціальна залежність тунельного струму від ширини проміжку між зондом і зразком – зберігається у всіх моделях контакту.

Високе просторове розділення СТМ пояснюється саме експоненціальною залежністю тунельного струму від дистанції між поверхнею

зразка і зондом. Роздільна здатність в напрямку нормалі до поверхні досягає часток ангстрема. Латеральне розділення обумовлене іншими причинами, які будуть розглянуті пізніше.



Рисунок 1.2 – Сканувальний тунельний мікроскоп. Загальний вигляд

1.2 Будова сканувального тунельного мікроскопа

Зовнішній вигляд сучасного сканувального тунельного мікроскопа показаний на рис. 1.2.

Принципова схема сканувального тунельного мікроскопа зображена на рис. 1.3. Пристрій позиціонування – п'єзосканер – переміщує зразок відносно зонда, а реєструвальна система фіксує дані про контраст зображення у кожній точці поверхні, які збирає зонд.

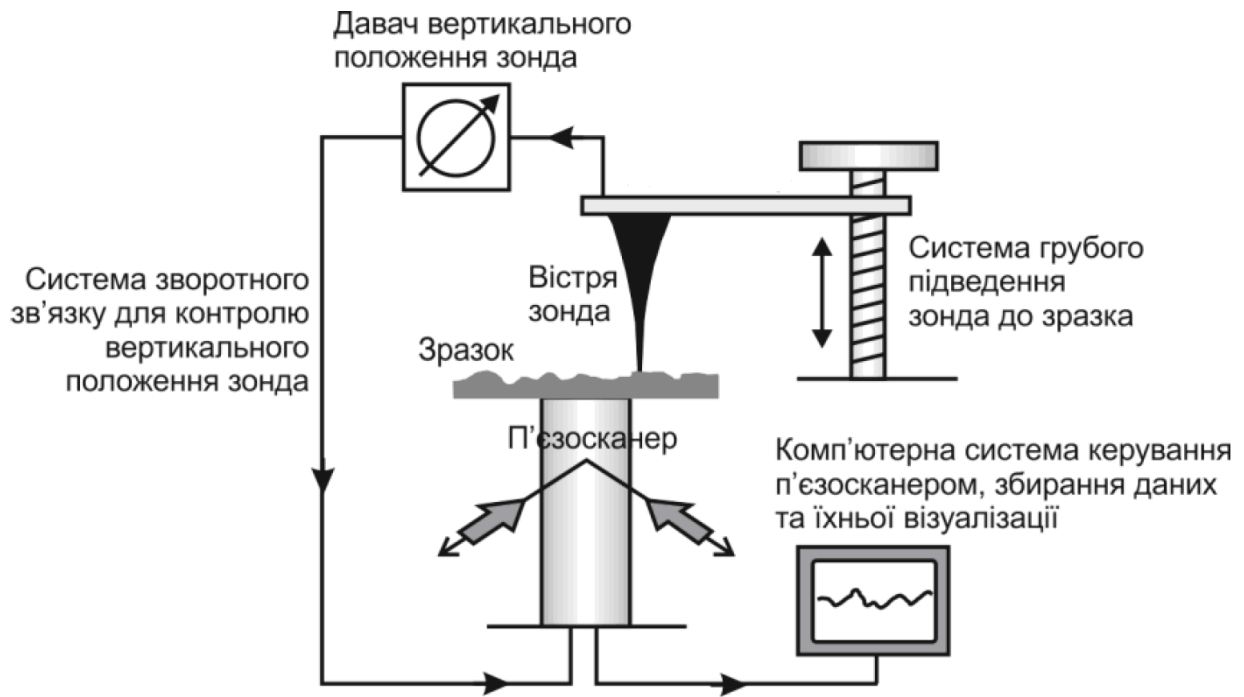


Рисунок 1.3 – Принципова схема СТМ [9]

Експоненціальна залежність тунельного струму від відстані дозволяє здійснювати з високою точністю регулювання відстані між зондом і зразком. СТМ є електромеханічною системою з негативним зворотним зв'язком. Система зворотного зв'язку (33) підтримує величину тунельного струму на заданому рівні I_0 . Якщо відстань між зондом і поверхнею змінюється, в системі 33 формується різницевий сигнал, пропорційний величині $\Delta I = I - I_0$, який посилюється до потрібної величини і подається на виконавчий елемент, яким є п'єзосканер. П'єзосканер відпрацьовує різницевий сигнал, наближаючи зонд до поверхні або відсуваючи його до тих пір, поки різницевий сигнал не стане рівним нулю. В існуючих сканувальних тунельних мікроскопах точність утримання відстані між зондом і поверхнею зразка досягає величини $\sim 0.01 \text{ \AA}$.

Зображення рельєфу поверхні в СТМ формується двома методами. За методом сталого тунельного струму (рис. 1.4 (а)) зонд переміщується вздовж поверхні, здійснюючи растрове сканування. При цьому зміна напруги на z -електроді п'єзоелементу в колі 33, яка з великою точністю відтворює рельєф

поверхні зразка, записується в пам'ять комп'ютера у вигляді функції $z = f(x, y)$, а потім візуалізується засобами комп'ютерної графіки.

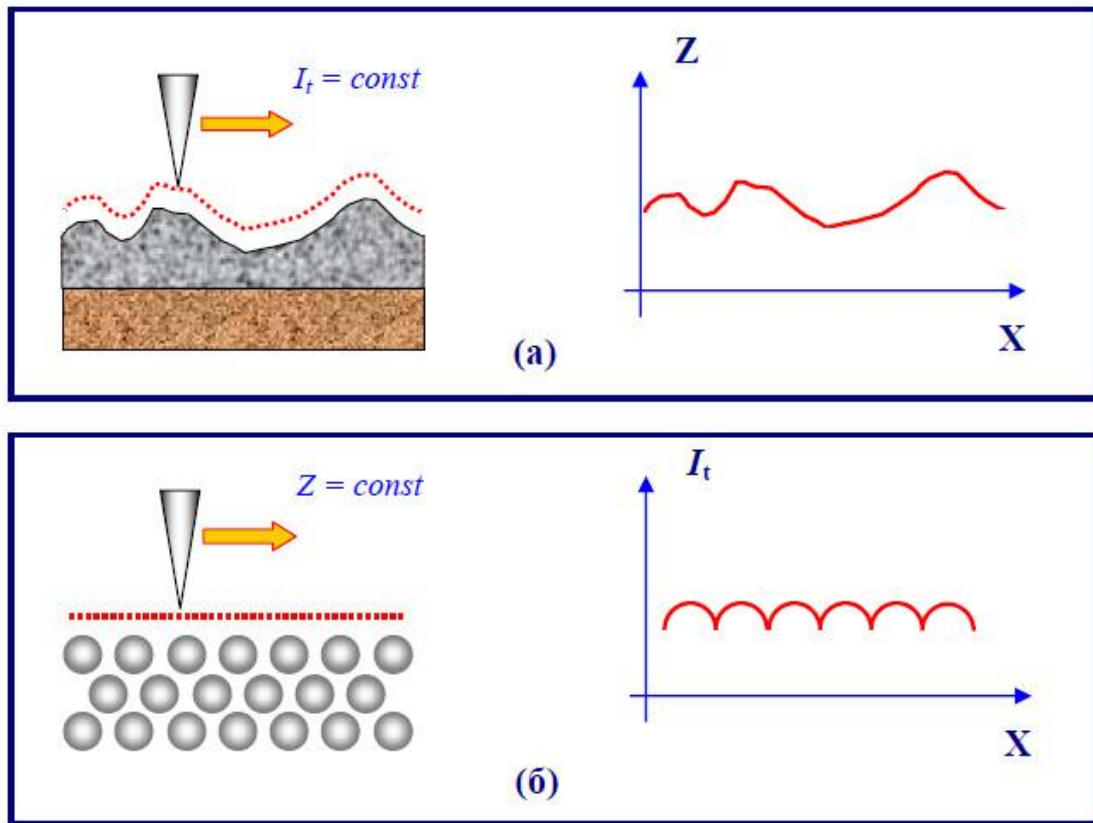


Рисунок 1.4 – Формування зображення поверхні за методами сталого тунельного струму (а) та сталої середньої відстані (б)

При дослідженні атомарно гладких поверхонь часто виявляється більш ефективним отримання СТМ - зображення поверхні зразка за методом сталої висоти $z = \text{const}$. В цьому випадку зонд переміщується над поверхнею на відстані декількох ангстрем, причому зміни тунельного струму реєструються в якості СТМ - зображення поверхні (рис. 1.4 (б)). Сканування проводиться або при відключеному ЗЗ, або зі швидкістю, що перевищує швидкість реакції ЗЗ, так що ЗЗ відпрацьовує тільки плавні зміни рельєфу поверхні. В даному способі реалізуються дуже високі швидкості сканування і висока частота отримання СТМ - зображень, що дозволяє вести спостереження за змінами, що відбуваються на поверхні, практично в реальному часі.

Сканувальні елементи тунельних мікроскопів виготовляють з п'єзоелектриків – матеріалів, що володіють п'єзоелектричними властивостями. П'єзоелектрики змінюють свої розміри в електричному полі. Рівняння зворотного п'єзоефекту для кристалів має вигляд

$$u_{ij} = d_{ijk} E_k, \quad (1.7)$$

де u_{ij} – тензор деформацій, E_k – компоненти електричного поля, d_{ijk} – компоненти тензора п'єзоелектричних коефіцієнтів. Вигляд цього тензора визначається типом симетрії кристала.

В різних технічних застосуваннях широкого поширення набули перетворювачі з п'єзокерамічних матеріалів. П'єзокераміка є поляризованим полікристалічним матеріалом, одержуваним методами спікання порошків сегнетоелектриків. Вона має здатність змінювати свої розміри (збільшувати або зменшувати, залежно від взаємної орієнтації векторів поляризації і прикладеного електричного поля). Вид тензора п'єзоелектричних констант для п'єзокераміки істотно спрощується – відмінними від нуля виявляються тільки три коефіцієнти, що характеризують поздовжні, поперечні (по відношенню до вектора поляризації) і зсувні деформації.

У сканувальній зондовій мікроскопії використовують трубчасті п'єзоелементи. Вони дозволяють отримати досить великі переміщення при відносно невеликих керуючих напругах. Трубчасті п'єзоелементи представляють собою порожнисті тонкостінні циліндри, зроблені з п'єзокерамічних матеріалів.

Найбільш широко використовуються сканери на основі одного трубчастого елемента. Загальний вигляд трубчастого сканера і схема розташування електродів показані на рис. 1.5. Вектор поляризації в трубці має радіальний напрямок.

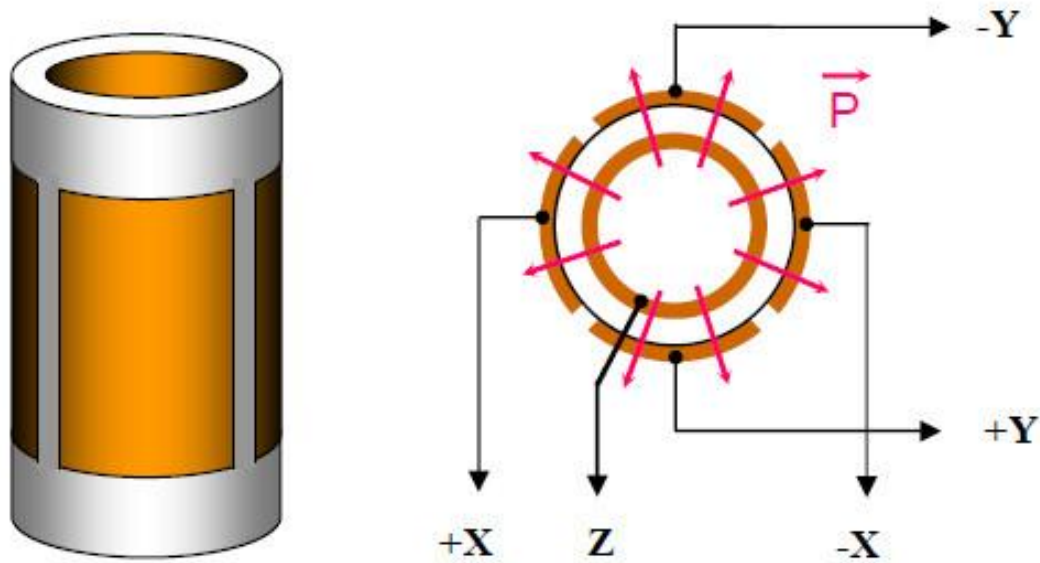


Рисунок 1.5 – Трубчастий п'єзосканер

Внутрішній електрод, як правило, суцільний. Зовнішній електрод сканера розділений уздовж твірних циліндра на чотири секції. При подачі протифазних напружень на протилежні секції зовнішнього електрода відбувається скорочення ділянки трубки в тому місці, де напрямок поля збігається з напрямком поляризації, і подовження там, де вони спрямовані протилежно. Це викликає вигин трубки у відповідному напрямку. Таким чином здійснюється сканування в площині xu . Зміна потенціалу внутрішнього електрода відносно зовнішніх секцій призводить до подовження або скорочення трубки уздовж осі z . Так реалізується трьохкоординатний сканер на базі однієї п'єзотрубки. Реальні сканувальні елементи часто мають більш складну конструкцію, однак принцип їх роботи залишається тим же самим.

Процес сканування поверхні в сканувальному тунельному мікроскопі має схожість з рухом електронного променя по екрану в електронно-променевій трубці. Зонд рухається вздовж лінії (рядка) спочатку в прямому, потім у зворотному напрямку (рядкова розгортка). Потім він переходить на

наступний рядок (кадрова розгортка). Рух зонда здійснюється за допомогою сканера під дією пилкоподібних напружень, що формуються цифроаналоговими перетворювачами. Реєстрація інформації про рельєф поверхні проводиться зазвичай на прямому проході.

Інформація, отримана за допомогою сканувального тунельного мікроскопа, зберігається у вигляді STM- кадру – двовимірного масиву цілих чисел a_{ij} , тобто матриці. Фізичний зміст цих чисел визначається величиною, яка оцифровується в процесі сканування. Кожному значенню пари індексів i, j відповідає певна точка поверхні зразка в межах поля сканування.

Візуалізація STM- кадрів проводиться засобами комп'ютерної графіки у вигляді тривимірних (3D) і двовимірних (2D) зображень. При 3D візуалізації зображення поверхні $z = f(x, y)$ будується в аксонометричній перспективі за допомогою пікселів або ліній. Додатково використовуються різні способи підсвічування пікселів, відповідних різній висоті рельєфу поверхні.

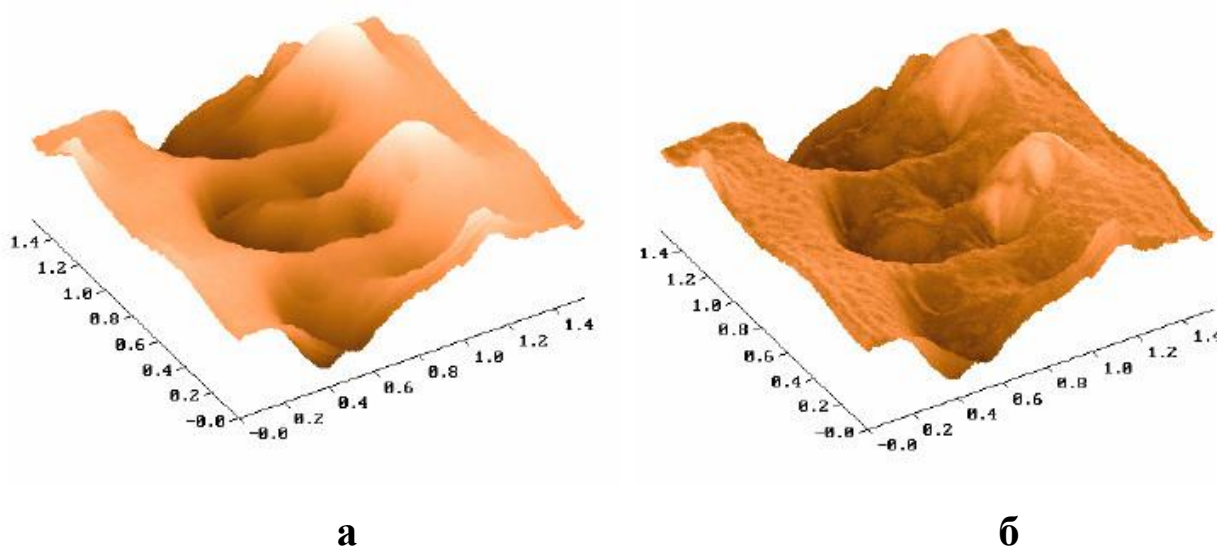


Рисунок 1.6 – 3D візуалізація рельєфу поверхні з підсвічуванням за висотою (а)
та з боковим підсвічуванням (б)

Найбільш ефективним способом розфарбовування 3D зображень є моделювання підсвічування точковим джерелом, розташованим в певній точці над поверхнею (рис. 1.6). При цьому вдається виділити дрібномасштабні нерівності рельєфу. Засобами комп'ютерної обробки і графіки реалізуються також масштабування і обертання 3D зображень.

При 2D візуалізації кожній точці поверхні $z = f(x, y)$ ставиться у відповідність колір. Найбільш часто використовуються градієнтні палітри, в яких розфарбування зображення виконується певним тоном в залежності від висоти точки поверхні.

Одним з недоліків, притаманних усім методам сканувальної зондової мікроскопії, є кінцевий розмір робочої частини зонда. Це призводить до суттєвого погіршення просторового розділення СТМ і значних спотворень зображення при скануванні поверхонь з нерівностями рельєфу, порівнянними з характерними розмірами робочої частини зонда.

Частково цю проблему вирішують розвинені останнім часом методи відновлення СТМ- зображень, засновані на комп'ютерній обробці даних з урахуванням конкретної форми зондів [10,11]. Найбільш ефективним методом відновлення поверхні є метод чисельної деконволюції [11], в якому використовують форму зонда, знайдену експериментально при скануванні тестових структур з добре відомим рельєфом поверхні.

2 ФАКТОРИ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ СТМ, І РОЗРАХУНОК ГРАНИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ

2.1 Усунення шкідливих факторів, що впливають на якість зображення СТМ

Для ефективного функціонування конструкція вимірювального вузла сканувального тунельного мікроскопа повинна задовольняти багатьом вимогам. Найважливішою з них є висока завадозахищеність. Це пояснюється великою сприйнятливістю тунельного контакту до зовнішніх вібрацій, температурних змін, акустичних і електричних завад. В даний час накопичений значний досвід і розроблені достатньо ефективні методи захищення сканувального тунельного мікроскопа від дії різних шкідливих чинників.

Будь-яка конструкція сканувального тунельного мікроскопа являє собою коливальну систему, що має певний набір власних частот ω_k . Зовнішні механічні впливи на частотах, що наближаються до ω_k , викликають резонанс в конструкції вимірювальних головок. Це призводить до коливань зонда відносно зразка і проявляється як паразитний періодичний шум, що спотворює і розмиває СТМ-зображення поверхні зразка. З метою зменшення впливу зовнішніх вібрацій вимірювальні головки складають з масивних металевих частин, що мають високі власні частоти (понад 100 кГц). Найменші резонансні частоти мають сканувальні елементи тунельних мікроскопів. При конструюванні сканувальних тунельних мікроскопів доводиться йти на компроміс між максимальним полем огляду сканувального елемента і його резонансної частотою. Типовими для сканерів є власні частоти в інтервалі $10 \div 100$ кГц.

Для захисту СТМ від зовнішніх вібрацій застосовують різні типи віброізолюючих систем. Умовно віброізолюючі системи можна поділити на пасивні і активні системи. Головна ідея, яка лежить в основі дії пасивних віброізолюючих систем, полягає в наступному. Амплітуда вимушених коливань

механічної системи швидко зменшується при збільшенні різниці між частотою зовнішньої сили і резонансною частотою системи. Типова амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) коливальні системи показана на рис. 1.7.

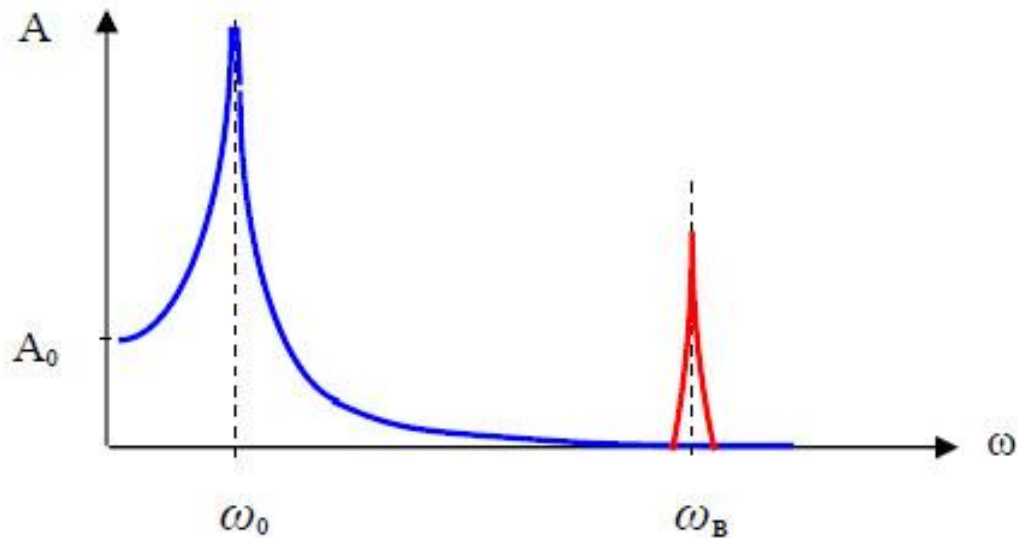


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення АЧХ коливальної системи. Червоним кольором показаний спектр зовнішніх вібрацій

Таким чином, зовнішні вібрації з частотами $\omega_B \gg \omega_0$ не чинять суттєвої дії на коливальну систему. Якщо встановити вимірювальну головку СТМ на віброізолюючій платформі або зафіксувати на пружному підвісі, то на головку потраплять зовні лише коливання, які мають частоту в околі власної частоти віброізолюючої системи. Оскільки значення резонансної частоти головок СТМ знаходиться в інтервалі $10 \div 100$ кГц, то забезпечивши для віброізолюючої системи низьку власну частоту $5 \div 10$ Гц, можна усунути вплив на пристрій з боку зовнішніх вібрацій. Для подавлення коливань на власній частоті віброізолюючої системи в її конструкцію включають дисипативні елементи.

В СТМ застосовують також активні системи подавлення вібрацій. Подібні пристрої є електромеханічними системами, в яких негативний зворотний зв'язок забезпечує стабільне положення віброізолюючої платформи відносно основи приладу.

Акустичні завади різного походження є ще одним негативним чинником, що впливає на якість зображення сканувального тунельного мікроскопа.

Акустичні хвилі безпосередньо діють на всі частини конструкції вимірювальних головок СТМ. Це призводить до коливань зонда відносно досліджуваного зразка. Для ізоляції СТМ від акустичних завад застосовують різні захисні ковпаки, що дозволяє істотно знизити рівень акустичних завад в зоні робочого проміжку мікроскопа. Найефективнішим захистом від акустичних завад є поміщення вимірювальної головки тунельного мікроскопа у вакуумну камеру.

Однією з найбільш важливих проблем тунельної мікроскопії є задача стабілізації положення зонда відносно поверхні досліджуваного зразка. Одним з головних джерел нестабільності позиціонування зонда є температурні зміни в оточуючому середовищі і/або поступове нагрівання елементів конструкції тунельного мікроскопа, що має місце під час роботи. Зміни температури конструкції супроводжуються появою термопружних деформацій.

Типові значення коефіцієнта теплового розширення матеріалів дорівнюють $10^{-5} - 10^{-6}$ град⁻¹. Отже, при нагріванні тіла довжиною 10 см на 1 градус його довжина збільшується на величину порядку 1 мкм. Такі деформації доволі сильно впливають на роботу тунельного мікроскопа. Для зниження термодрейфа застосовується термостатизування вимірювальних головок СТМ або в конструкцію головок включаються термокомпенсаційні елементи.

Ідея термокомпенсації полягає в наступному. Конструкція СТМ є сукупністю елементів, які мають різні значення коефіцієнта теплового розширення. Найпростіший шлях зниження термодрейфа позиції зонда на осі z – це включення в конструкцію вимірювальної головки СТМ компенсуючих елементів з тим же розташуванням і комплектацією, як це має місце в самій конструкції. В результаті, зміщення зонда уздовж осі z внаслідок зміни температури вимірювальної головки буде мінімізоване. Для стабілізації позиції зонда в площині xy застосовують аксіально-симетричні конструкції вимірювальної головки мікроскопа.

2.2 Розрахунок граничної роздільної здатності СТМ

Роздільною здатністю мікроскопа називається найменша відстань між двома точками поверхні зразка, зображення яких ще розрізняються, тобто виглядають як два окремі об'єкти.

Факторами, що впливають на роздільну здатність СТМ в напрямку z , є: 1) забрудненість поверхні зразка; 2) неконтрольовані коливання зонду; 3) термодрейф координати вістря зонду; 4) шуми у пристрої. З них перші три принципово можуть бути усунені, тому граничну роздільну здатність СТМ в напрямку z визначають шуми.

Різновидами шумів, які виявляють себе у СТМ, є тепловий і дробовий. Тепловий шум є наслідком випадкових флуктуацій швидкості носіїв струму у резистивному матеріалі. Дробовий шум виникає в тому випадку, коли реалізується випадковий процес генерації або поглинання дискретних носіїв струму, як це має місце під час тунелювання електронів через проміжок між зондом і зразком.

Для розрахунку шумових характеристик електронних пристроїв використовують еквівалентні схеми. Електронна схема з власними шумами може бути представлена у вигляді безшумової схеми з зовнішніми генераторами шуму [12].

Для тунельного струму користуємось наближеною формулою

$$I \approx I_0 \exp(-2\kappa z), \quad (2.1)$$

де I_0 – струм при торканні зонду поверхні зразка ($z = 0$), $\kappa \equiv \sqrt{2mU_0} / \hbar$, U_0 – висота потенціального бар'єру, яка приблизно дорівнює характерному значенню роботи виходу 5 eV (eV набагато менше цієї величини і складає кілька десятих електрон-вольта). Звичайно I_0 дорівнює кільком мікроамперам.

Чутливість зонда в нормальному до зразка напрямку

$$K \equiv |dI / dz| = 2\kappa I. \quad (2.2)$$

Граничне розділення в цьому напрямку δ_z дорівнює

$$\delta_z = \sqrt{\delta I^2} / K = \sqrt{\delta I^2} / 2kI, \quad (2.3)$$

де $\sqrt{\delta I^2}$ – середня величина флуктуацій струму.

Розрахуємо спектральну густину теплових флуктуацій струму у тунельному контакті.

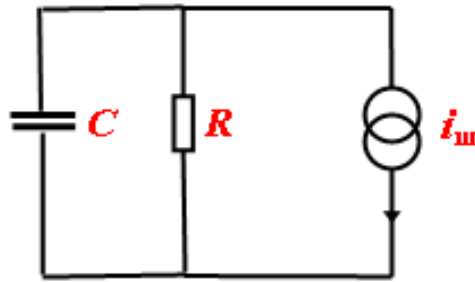


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема тунельного контакту

Тунельний контакт моделюємо паралельними опором R і ємністю C , приєднаними до джерела флуктуацій струму (рис. 2.2). В зробленому нами припущенні (2.1) щодо вигляду тунельного струму для опору контакту маємо формулу

$$R \approx R_0 \exp 2\kappa z, \quad (2.4)$$

де $R_0 \cong 10^5$ Ом. Для типового значення $z = 0.3$ нм отримуємо $R \approx 100$ МОм.

Спектральна густина теплових флуктуацій тунельного струму

$$S_T(\omega) = 4kT \operatorname{Re}(1/Z(\omega)) = 4kT/R, \quad (2.5)$$

де $Z(\omega)$ – імпеданс контакту. За температури $T = 300$ К для $z = 0.3$ нм $S_T(\omega) \cong 10^{-28}$ А²/Гц.

Ще одне джерело флуктуацій струму виникає в зв'язку з випадковим характером тунелювання електронів крізь потенціальний бар'єр (дробовий шум). Спектральна густина дробового шуму в контакті

$$S_{\text{sh}}(\omega) = 2eI. \quad (2.6)$$

За формулою (2.1) знаходимо, що значення тунельного струму I за ширини бар'єру $z = 0.3$ нм дорівнює кільком наноамперам. Йому відповідає спектральна густина дробового шуму $S_{\text{sh}}(\omega) \cong 10^{-27} \text{ А}^2/\text{Гц}$, яка приблизно на порядок більша за спектральну густина теплового шуму.

Смуга частот $\Delta\nu$ приладу визначається часом накопичення інформації, тобто часом τ експозиції ділянки зразка, яка відповідає одному пікселю зображення. Для оцінок приймемо $\tau = 10^{-4} \text{ с}$, $\Delta\nu \approx 1/\tau = 10^4 \text{ Гц}$. Для середньої величини шумових флуктуацій тунельного струму маємо оцінку

$$\sqrt{\delta I^2} = \sqrt{S_{\text{sh}}(\omega)\Delta\nu} \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ А}. \quad (2.7)$$

За формулою (2.3) знаходимо граничне розділення СТМ у нормальному до поверхні зразка напрямку: $\delta_z \approx 10^{-3} \text{ Å}$.

На роздільну здатність у площині xy впливає, перш за все, точність позиціонування зонду. Важливе значення має також геометрія вістря зонду. Але ані перший, ані другий фактори не визначають граничне розділення. Зокрема, в принципі можна виготовити зонд з одним атомом на самому кінці вістря.

Щоб зрозуміти, що саме обмежує роздільну здатність СТМ у повздовжньому напрямку, треба відмовитись від простої одновимірної моделі тунельного контакту, якій відповідає вираз (2.1) для тунельного струму. Навіть у випадку вістря з одним атомом, коли хвильова функція електронів провідності є досить сильно локалізованою, вона все ж таки помітно відмінна від нуля у значній за атомним масштабом області біля поверхні зразка. Вістря збирає тунельний струм з цієї області, тобто прилад усереднює рельєф поверхні зразка у її межах.

Таким чином, розділення у площині xy обмежується розмірами області локалізації тунельного струму на поверхні зразка.

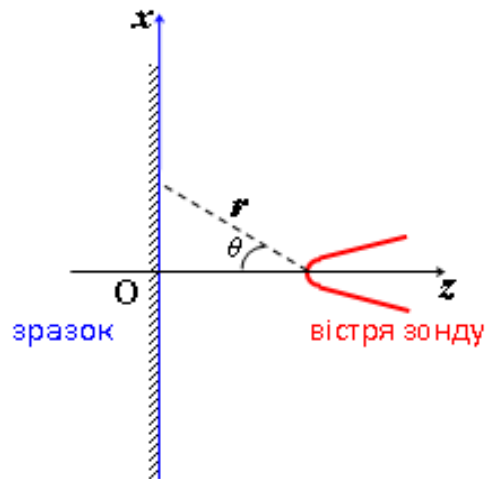


Рисунок 2.3 – Схема тунельного переходу до розрахунку роздільної здатності у площині xy

Рівняння Шредингера в області між вістрям зонду і поверхнею зразка (рис. 2.3) має вигляд

$$\Delta\psi - \kappa^2\psi = 0, \quad (2.8)$$

Розв'язок цього рівняння

$$\psi = A \exp(-\kappa r)/r, \quad A = \text{const}. \quad (2.9)$$

Знехтуємо відбиванням електронів від поверхні зразка, тобто будемо вважати, що всі електрони, які тунелюють до поверхні, дають внесок в струм. Потік електронів через поверхню зразка

$$j \sim |\psi|^2 \cos\theta = A^2 z \exp(-2\kappa r)/r^3. \quad (2.10)$$

Тунельний струм через ділянку S поверхні зразка дорівнює $I(S) = \int_S j dS$.

Визначимо величину R наступним чином:

$$I(z \leq r \leq R)/I(z \leq r < \infty) = 0.9. \quad (2.11)$$

Обчислення з використанням формули (2.10) приводять до співвідношення

$$\frac{R}{z} \exp(\kappa(R-z)) = \sqrt{10}. \quad (2.12)$$

Користуючись рівнянням (2.12), можна знайти R . В першому наближенні в цьому рівнянні можна прийняти $R/z = 1$. Тоді маємо

$$R - z \approx 1.2 / \kappa. \quad (2.13)$$

Підставляючи типові значення $\kappa = 1.2 \text{ 1/\AA}$, $z = 3 \text{ \AA}$, отримуємо $R = 4 \text{ \AA}$.

Як випливає з визначення (2.11) величини R , мікроскоп усереднює деталі поверхні зразка в області радіусу $x = \sqrt{R^2 - z^2}$, тому ця величина може слугувати оцінкою роздільної здатності мікроскопа в площині поверхні зразка. Користуючись отриманим значенням R , знаходимо, що $x \approx 3 \text{ \AA}$.

ВИСНОВКИ

1. Сканувальна тунельна мікроскопія – потужний сучасний метод дослідження будови і локальних властивостей поверхневих шарів з високим просторовим розділенням. Вона застосовується у фізиці і хімії поверхні, нанометрії, в дослідженнях макромолекул та інших біологічних структур. СТМ є необхідним інструментом у нанотехнологіях.

2. Якість СТМ- зображення залежить від усунення або нейтралізації негативних чинників, які на неї впливають – вібрацій, акустичних та електромагнітних завад, термодрейфу у позиціонуванні зонду.

3. Граничну роздільну здатність СТМ в напрямку нормалі до поверхні зразка визначають шуми.

Проведений розрахунок показав, що спектральна густина дробового шуму у тунельному контакті складає $S_{sh}(\omega) \cong 10^{-27} \text{ A}^2/\text{Гц}$ і приблизно на порядок перевищує спектральну густина теплового шуму. Оцінка роздільної здатності СТМ в нормальному напрямку дала в результаті $\delta_z \approx 10^{-3} \text{ Å}$.

4. Латеральне (повздовжнє) розділення обмежується розмірами області локалізації тунельного струму на поверхні зразка. Була виконана оцінка граничної роздільної здатності СТМ в цьому напрямку, в результаті якої отримано $\delta_{xy} \approx 3 \text{ Å}$.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. **Bai, C.** Scanning Tunneling Microscopy and its Application [Text] / C. Bai. – Berlin- Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. – 348 p.
2. Scanning probe microscopy in nanoscience and nanotechnology [Text] / Ed. B. Bhushan. – Springer, 2010. – 987 p.
3. **Миронов, В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] / В.Л. Миронов. – М.: Техносфера, 2009. – 144 с.
4. **Binnig, G.** Scanning tunneling microscopy / G. Binnig, H. Rohrer // *Helv. Phys. Acta.* – 1982. – v. 55, № 6. – p. 726 – 735.
5. **Binnig, G.** Tunneling through a controllable vacuum gap/ G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel // *Appl. Phys. Lett.* – 1982. – v. 40. – p. 178.
6. **Ландау, Л.Д.** Квантовая механика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2001. – 804 с.
7. **Simons, J.G.** Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film / J.G. Simons // *J. Appl. Phys.* - 1963. – v. 34. – p. 1793.
8. **Simons, J.G.** Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film / J.G. Simons // *J. Appl. Phys.* – 1963. – v. 34. – p. 2581.
9. **Тузяк, О.Я.** Основи електронної та зондової мікроскопії [Текст] / О.Я. Тузяк, В.Ю. Курляк. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. – 296 с.
10. **Williams, P.M.** Blind reconstruction of scanning probe image data / P.M. Williams, K.M. Shakesheff et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 1996. – v. 14 (2). – p. 1557-1562.
11. **Бухараев, А.А.** ССМ метрология микро- и наноструктур / А.А. Бухараев, Н.В. Бердунов, Д.В. Овчинников, К.М. Салихов // *Микроэлектроника.* – 1997. – т. 26, № 3. – с. 163 -175.
12. **Букингем, М.** Шумы в электронных приборах и системах [Текст] / М. Букингем. – М.: Мир, 1986. – 399 с.