МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Розробка програмно-апаратного комплексу для визначення якості обробки поверхні»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-63
Гензаровський А.В.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма: Прикладна фізика
енергетичних систем
Керівник:
доц. Сухов Р.В.
Рецензент:

Харків – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ доц. Сухов Р. В.

підпис

"____" _____2020 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Гензаровський Андрій Володимирович

1.Тема роботи «Розробка програмно-апаратного комплексу для визначення якості обробки поверхні»

керівник роботи Сухов Руслан Володимирович

ені наказом по університету від "23" Жовтня 2020 року №0210-05/1907

2. Строк подання студентом роботи 27.11.2020

3. Перелік питань, які потрібно розглянути:

1) Огляд літератури та формулювання задачі про розробку програмно-апаратного комплексу для визначення якості обробки поверхні.
2) Вивчення основних методів дослідження поверхні на атомарному рівні.
3) Розробка системи визначення якості обробки поверхні.
4) Практичне застосування розробленої системи.
5) Підготовка наукової публікації.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми, узгодження, а також затвердження її на кафедрі
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Затвердження теми на кафедрі
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи(висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання 26.10.2020

Студент _____ АНДРІЙ ГЕНЗАРОВСЬКИЙ

підпис

Керівник роботи _____ РУСЛАН СУХОВ

підпис

РЕФЕРАТ

Гензаровський Андрій Володимирович «Розробка програмно-апаратного комплексу для визначення якості обробки поверхні»

Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики.

Дипломна робота представлена на 39 сторінках; складається з вступу, 3 розділів та висновків; містить 19 рисунків, список використаної літератури з 19 найменувань.

Мета даної роботи – розробка програмно-апаратного комплексу для визначення якості обробки поверхні.

Об’єкт дослідження – скануюча тунельна мікроскопія, дослідження поверхні на атомарному рівні.

В ході виконання роботи було розроблено програмно-апаратний комплекс для дослідження поверхні на атомарному рівні методом тунельної мікроскопії.

Предмет дослідження – метод тунельної мікроскопії.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТУНЕЛЬНИЙ СТРУМ, ТУНЕЛЬНА МІКРОСКОПІЯ, СКАНУЮЧИЙ ЗОНДОВИЙ МІКРОСКОП, ЗОНД, КАНТИЛЕВЕР

РЕФЕРАТ

Гензаровский Андрей Владимирович «Разработка программно-аппаратного комплекса для определения качества обработки поверхности»

Квалификационная работа магистра прикладной физики.

Дипломная работа представлена на 39 страницах; состоит из введения, 3 глав и выводов; содержит 19 рисунков, список использованной литературы из 19 наименований.

Цель данной работы - разработка программно-аппаратного комплекса для определения качества обработки поверхности.

Объект исследования - сканирующая туннельная микроскопия, исследования поверхности на атомарном уровне.

В ходе выполнения работы был разработан программно-аппаратный комплекс для исследования поверхности на атомарном уровне методом туннельной микроскопии.

Предмет исследования - метод туннельной микроскопии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТУННЕЛЬНЫЙ ТОК, ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ, СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ, ЗОНД, КАНТИЛЕВЕР

ABSTRACT

Genzarovsky Andrey Vladimirovich "Development of a software and hardware complex for definition of quality of processing of a surface"

Qualification work of the master of applied physics.

Thesis is presented on 39 pages; consists of an introduction, 3 chapters and conclusions; contains 19 figures, a list of references from 19 items.

The purpose of this work is to develop a software and hardware complex to determine the quality of surface treatment.

The object of research is scanning tunneling microscopy, surface research at the atomic level.

In the course of the work, a software and hardware complex was developed to study the surface at the atomic level by tunneling microscopy.

The subject of research is the method of tunneling microscopy.

KEY WORDS: TUNNEL CURRENT, TUNNELING MICROSCOPY, SCANNING PROBES MICROSCOPE, PROBE, CANTILEVER

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1 РОЗГЛЯД МЕТОДІВ СКАНУЮЧОЇ ЗОНДОВОЇ МІКРОСКОПІЇ 11
1.1 Магнітно-силовий мікроскоп 11
1.2 Атомно-силова мікроскопія 14
1.3 Електросилова мікроскопія 16
1.4 Скануюча тунельна мікроскопія 19
1.5 Підсумок 22
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СКАНУЮЧОЇ ТУНЕЛЬНОЇ МІКРОСКОПІЇ 23
2.1 Фізичні принципи роботи СТМ 24
2.2 Конструкція скануючого тунельного мікроскопа 27
3 ОПИС БУДОВИ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ СТВОРЕНОЇ СТМ 31
3.1 Електронна частина СТМ 31
3.2 Випробування створеного пристрою 36
ВИСНОВКИ 37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 38

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА АБРЕВІАТУР

СТМ – скануючий тунельний мікроскоп

СЗМ – скануючий зондовий мікроскоп

АСМ – атомно-силовий мікроскоп

МСМ – магнітно-силовий мікроскоп

ЕСМ – електросиловий мікроскоп

ВСТУП

Актуальність роботи. В сучасних реаліях одним з найуспішніших методів дослідження властивостей поверхні твердого тіла являється скануюча зондова мікроскопія(СЗМ). Скануючими зондовими мікроскопами називають прилади, призначені для вивчення властивостей поверхні за допомогою твердотільних загострених зондів(голок) в процесі їх взаємного переміщення по заданим алгоритмам. Будь-який скануючий зондовий мікроскоп складається з твердотільного зонда, сканера, що забезпечує відносне переміщення зонда і зразка за трьома координатами, системи підведення зонда і зразка, системи реєстрації аналітичних сигналів, електронної системи управління і зчитування данних, системи запису-обробки інформації, системи віброзахисту [19]. Минуле десятиліття перетворило зондову мікроскопію з незатребуваного інструменту, який використовували лише деякі дослідницькі групи в широко поширену методику для дослідження властивостей поверхні твердих тіл на атомарному рівні. Багато областей сучасної науки тяжко уявити без застосування зондової мікроскопії для дослідження поверхні твердих тіл; прикладами таких областей можуть бути: фізика поверхні напівпровідників, мікроелектроніка, енергетика та багато інших. Скануюча зондова мікроскопія також знаходить широке застосування в такому науково-технічному напрямку, як нанотехнології, де служить основою методів створення структур, для яких характерні нанометрові масштаби. Все більшу увагу науковців притягують нанорозмірні об'єкти, так як мають унікальні властивості, відмінні від макроскопічного стану речовини. Дослідження нанооб'єктів неможливо без сучасних дослідницьких та експериментальних методик. Скануюча тунельна мікроскопія дозволяє проводити дослідження поверхності провідних зразків та отримувати знімки з атомною роздільною здатністю. Подібні методики є невід'ємною частиною експериментів із матеріалознавства та нанофізиці. Комерційна експериментальна техніка такого роду має вартість від сотень тисяч до мільйонів гривень та недосяжна для більшості вітчизняних

науковців. Новизна даної роботи полягає у тому, щоб створити тунельний мікроскоп з набагато меншою вартістю, використовуючи сучасну елементну базу та засади програмування.

Метою даної роботи була розробка та програмна реалізація комплексу для визначення якості обробки поверхні.

В ході виконання дипломної роботи були вирішені наступні завдання:

– Створення технічного завдання;

– Проведення аналізу існуючих скануючих мікроскопів;

– На основі проведеного аналізу був обраний метод тунельної мікроскопії;

– Були зібрані необхідні теоретичні відомості для СТМ;

– Створено схему тунельної мікроскопії;

– Створення робочого зразку;

– Тестування робочого зразку;

1 РОЗГЛЯД МЕТОДІВ СКАНУЮЧОЇ ЗОНДОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

Скануючий зондовий мікроскоп (СЗМ) - це інструмент, який використовується для вивчення поверхонь на нанорозмірному рівні. СЗМ формують зображення поверхні за допомогою фізичного зонда, який торкається поверхні зразка для сканування поверхні і збору даних, зазвичай одержуваних у вигляді двовимірної сітки точок даних і відображаються у вигляді комп'ютерного зображення. Першим СЗМ був тунельний мікроскоп(СТМ), розроблений в дослідницькій лабораторії IBM Гердом Біннігом та Генріхом Рорером в 1982 році [1].

В своїх роботах вони показали, що це досить простий та ефективний засіб дослідження поверхні з роздільною здатністю навіть до атомарного рівня. Справжнє визнання ця методика отримала після візуалізації атомарної структури поверхні різних металів та частково реконструйованої поверхні кремнію. У 1986 році за створення мікроскопа Г. Біннінгу та Г. Рореру була присуджена Нобелевська премія по фізиці. Після створення тунельного мікроскопу протягом короткого проміжку часу були створені атомно-силовий мікроскоп (АСМ), магнітно-силовий мікроскоп (МСМ), електросиловий мікроскоп (ЕСМ), та інші прилади, які працюють схожим чином. Останнім часом з’явилося значна кількість монографій і обзорів, присвячених методам та можливостям скануючої зондової мікроскопії [2]. В даному розділі розглянемо основні зондові мікроскопи та принципи їх роботи.

1.1 Магнітно-силовий мікроскоп

Принцип роботи магнітно-силового мікроскопа(МСМ) заснований на магнітній взаємодії зонда зі зразком. По суті МСМ представляє собою атомносиловий мікроскоп, у якого зонд виготовлений з магнітного матеріалу. Сила, що діє на такий зонд в магнітному полі в просторі навколо зразка, призводить до вигину консолі. Таким чином, реєструючи величину вигину консолі, можна контролювати силу магнітної взаємодії зонда зі зразком. На даний момент МСМ є одним з основних інструментів для вивчення розподілу

намагніченості в магнітних структурах. Магнітні сили є далекодіючими, тому в силовій взаємодії бере участь велика кількість атомів зонда і зразка, розташованих не тільки на їх поверхні, але і в більш глибоких шарах. Представлено магнітну взаємодію зонда зі зразком(Рис. 1.1) [3].

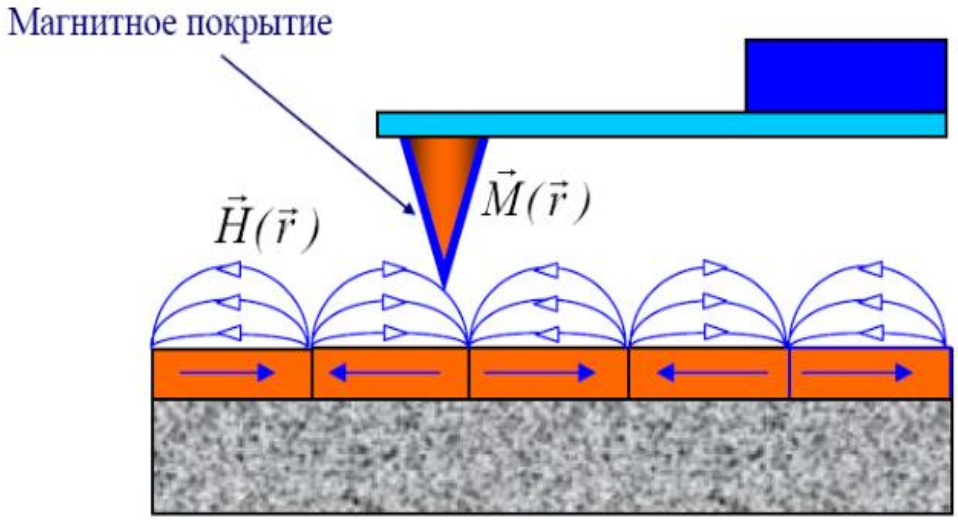


Рис. 1.1 Зонд МСМ в магнітному полі зразку

Магнітний момент зонду МСМ може бути представлений як суперпозиція елементарних магнітних диполів виду:

$$\vec{M}_p(\vec{r}_p)dV_p$$

де $\overrightarrow{M_p}(\overrightarrow{r_p})$ – розподіл намагніченості в магнітному покритті зонда, dV_p – елементарний об'єм(індекс p відноситься до зонду, індекс s відноситься до зразку). Тоді енергія магнітної взаємодії між зондом та зразком запишеться в вигляді:

$$E = -\int_{V_p} \vec{M}_p(\overrightarrow{r_p})\vec{H}_s(\vec{r}+\vec{r}_p)\,dV_p,$$

Де $\vec{H}_s$ – поле, створене зразком в точці $\vec{r}+\vec{r}_p$, а $\vec{r}$ – радіус вектор кінчика магнітного зонда. Інтегрування здійснюється по об'єму магнітного шару зонда V_p(Рис. 1.2) [3].

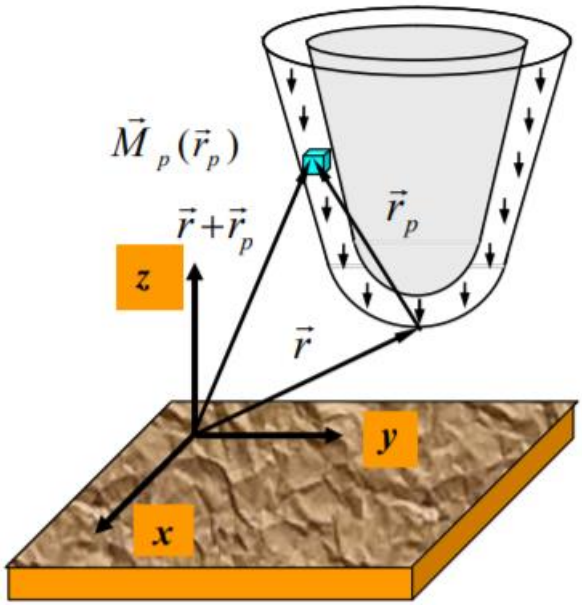


Рис. 1.2 Розрахунок взаємодії зонда МСМ з магнітним полем зразку

Сила, діюча на зонд, може бути представлена у вигляді:

$$\vec{F} = -\vec{\Delta}E = \int_{V_p} \vec{\nabla}\left(\vec{M}_p(\vec{r_p})\vec{H_s}(r + r_p)\right) dV_p,$$

А при відсутності наведених струмів:

$$\vec{F} = \int_{V_p} \left(\overrightarrow{M_p}(\vec{r_p}) \cdot \vec{\nabla}\right) \overrightarrow{H_s}(\vec{r} + \vec{r_p}) dV_p.$$

В МСМ вертикальне відхилення кантилевера від положення рівноваги відбувається під дією Z- компоненти сили магнітної взаємодії між зондом та поверхнею зразку:

$$F_z = \int\limits_{V_p} \left(M_{px}\frac{\partial H_{sx}}{\partial z} + M_{py}\frac{\partial H_{sy}}{\partial z} + M_{pz}\frac{\partial H_{sz}}{\partial z}\right) dV_p,$$

А Z- компонента градієнта магнітної сили буде визначатися виразом:

$$\acute{F}_z = \frac{\partial F_z}{\partial z} = \int_{V_p} \left(M_{px}\frac{\partial^2 H_{sx}}{\partial z^2} + M_{py}\frac{\partial^2 H_{sy}}{\partial z^2} + M_{pz}\frac{\partial^2 H_{sz}}{\partial z^2}\right) dV_p.$$

Для отримання МСМ зображень зразків застосовуються квазістатичні та коливальні методики [3].

Метод не забезпечує високу швидкість отримання результатів, але дає можливість їх кількісної оцінки. Основною перевагою МСМ є те, що цей

метод має високу чутливість та якість. А основним недоліком являється його висока вартість.

1.2 Атомно-силова мікроскопія

Атомно-силова мікроскопія - один з основних видів скануючої зондової мікроскопії, заснований на ван-дер-ваальсівських взаємодіях зонда з поверхнею зразка. Принцип дії атомного силового мікроскопа (АСМ) заснований на використанні сил атомних зв'язків, що діють між атомами речовини. На малих відстанях між двома атомами діють сили відштовхування, а на великих - сили тяжіння. Абсолютно аналогічні сили діють і між будь-якими зближующимися тілами. У скануючому атомному силовому мікроскопі такими тілами служать досліджувана поверхня і ковзаюче над нею вістря. Схема роботи АСМ(Рис. 1.3).



Рис. 1.3 Схема роботи АСМ

Зазвичай в приладі в якості зонда використовується голка з площею вістря в один або кілька атомів, закріплена на кантільоверамі, який плавно ковзає над поверхнею зразка. На виступаючому кінці кантилеверу (над

шипом) розташований дзеркальний майданчик, на який падає і від якого відбивається промінь лазера. Коли зонд опускається і піднімається на нерівностях поверхні, відбитий промінь відхиляється, і це відхилення реєструється фотодетектором, а сила, з якою шип притягується до довколишніх атомів реєструється пьезодатчиком [4]. Дані фотодетектора і пьезодатчика використовуються в системі зворотного зв'язку, яка може забезпечувати, наприклад, постійну величину сили взаємодії між мікрозондом і поверхнею зразка. В результаті, можна будувати об'ємний рельєф поверхні зразка в режимі реального часу. Роздільна здатність даного методу складає приблизно 0,1-1 нм по горизонталі і 0,01 нм по вертикалі. Кантилевер (від англ. Cantilever - консоль, балка) - одна з основних складових частин скануючого зондового мікроскопа яка являє собою масивну прямокутну основу, розмірами приблизно 1,5 × 3,5 × 0,5 мм, з виступаючою з нього балкою (власне кантилевер) , шириною близько 0,03 мм і довжиною від 0,1 до 0,5 мм. На нижньому кінці канилевера розташовується голка, яка взаємодіє зі зразком. Радіус вістря голки промислових консолей знаходиться в межах 5-90 нм, лабораторних - від 1 нм. Верхня сторона кантилеверу над голкою є дзеркальною для відбиття лазерного променю. У деяких випадках для покращення здатності відбиття кантилевера на нього напилюють тонкий шар алюмінію. За своєю структурою кантилевер найчастіше представляє собою монокристал кремнію або нітриду кремнію. Голка також може бути з кремнію, нітриду кремнію або алмазу [4]. Зовнішній вигляд кантилевера показаний на Рис. 1.4.

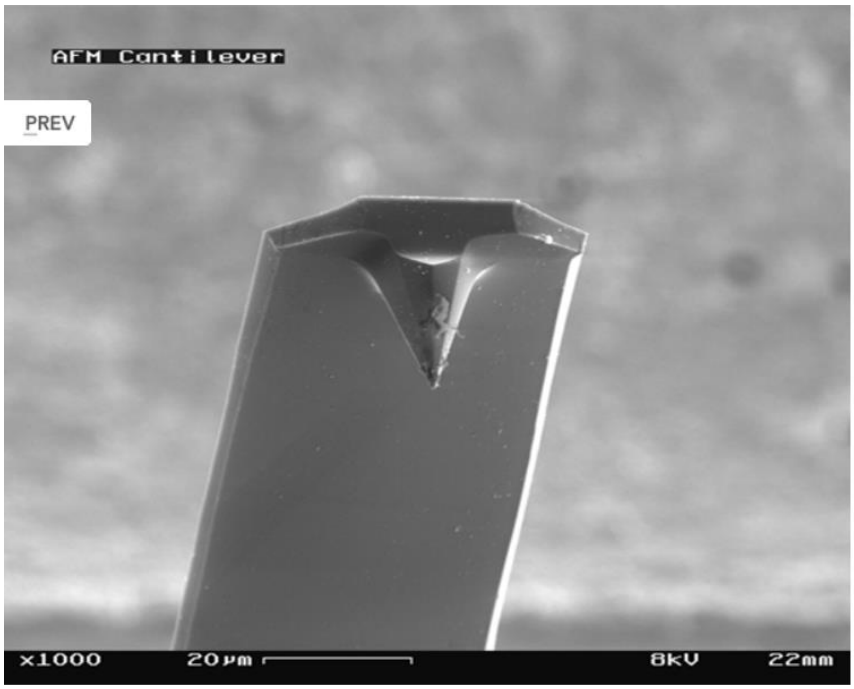


Рис. 1.4 Зовнішній вигляд кантилевера

Атомно-силовий мікроскоп має низку переваг. АСМ дозволяє отримати тривимірний рельєф поверхні. Крім того, на вивчаєму поверхню не потрібно наносити шар металу, який окремих випадках може призвести до помітної деформації поверхні. Також для роботи АСМ не потрібен вакуум, його можливості можуть бути реалізовані на повітрі та навіть в воді, що відкриває можливість дослідження біомолекул.

До недоліків атомно-силової мікроскопії слід віднести невеликий розмір поля сканування. Максимальний перепад висот становить кілька мікрон, а максимальне поле сканування в кращому випадку становить близько 150 × 150 мікрон. Також при високій роздільній здатності якість зображення визначається радіусом кривизни кінчика зонда, що при неправильному виборі зонда призводить до появи артефактів на вихідному зображенні.

1.3 Електросилова мікроскопія

Електросилова мікроскопія - спеціальний режим атомно-силової мікроскопії, що дозволяє отримувати інформацію про градієнти електричного

поля над поверхнею зразка, а також про величину і знак локалізованих на ній зарядів. ЕСМ може застосовуватися для перевірки якості контактів і пошуку дефектів в електричних схемах, виявлення пов'язаних зарядів, читання і запису інформації за допомогою зміни розташування зарядів на поверхні [5]. Схематичне зображення ЕСМ наведено на Рис. 1.5.

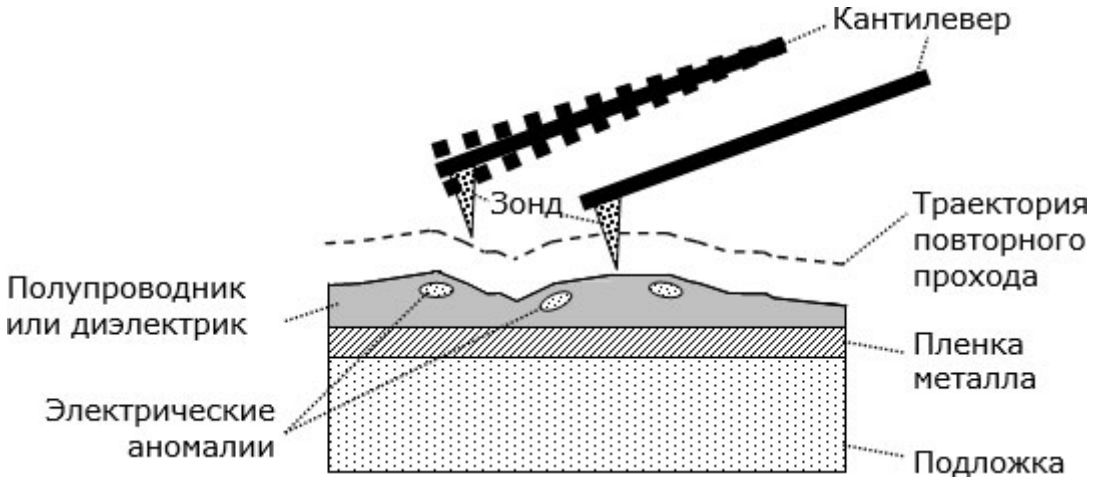


Рис. 1.5 Схема ЕСМ

Методи скануючої електронної мікроскопії для аналізу матеріалів знайшли широке застосування в рішенні конкретних наукових і технологічних завдань внаслідок їх високої інформативності і достовірності отриманих результатів дослідження [6]. Найважливішими параметрами ЕСМ є прискорююча напруга, робоча відстань та зондовий струм. Ці параметри необхідні для створення зображення та аналізу інформації, що міститься на цих зображеннях.

Прискорювальна напруга між катодом і анодом задає енергію первинних електронів, скануючих поверхню зразка. Від енергії первинних електронів і щільності досліджуваного матеріалу залежить глибина проникнення електронів в матеріал. Чим вище енергія первинних електронів і нижче щільність матеріалу, тим більше глибина проникнення електронів в досліджуваний матеріал. В результаті цього зображення визначається не

тільки інформацією про безпосередній поверхні зразка, а й структурами, які розміщуються на деякій відстані під поверхні. Таким чином для того, щоб отримати як найбільше інформації про саму поверхню зразка, необхідно працювати, по можливості з більш низькою прискореною напругою. В свою чергу робоча відстань визначається як відстань між сфокусованою поверхнею зразка та краєм об'єктної лінзи. Ця відстань є визначною для співвідношення сигналу до шуму, глибини різкості і одержуваного мінімального збільшення. Для зміни робочої відстані в мікроскопі предметний столик зміщується у вертикальному направленні. Внаслідок цього зацікавлене місце на зразку виходить за межі фокуса і для того, щоб відповідне місце на зразку з'являлося різко, проводиться додаткове фокусування за допомогою зміни інших керуючих параметрів. Зондовий струм або струм падаючого пучка електронів визначає діаметр променя, який робить вирішальний вплив на одержуване розширення і на співвідношення сигналу до шуму в зображенні. Якщо зондовий струм зменшується, то також паралельно зменшується і діаметр променя, в результаті цього в центрі плями буде менше первинних електронів і, разом з тим, зменшуються вторинні процеси, які виявляються детектором. Внаслідок цього погіршується співвідношення сигналу до шуму, але збільшується розширення, яке залежить безпосередньо від діаметра луча. Якщо ж зондовий струм збільшується, то співвідношення сигналу та шуму поліпшується, а отримане розширення погіршується [7].

. До переваг даного методу можна віднести:

- Велика роздільна здатність
- Висока глибина різкості
- Відносно невелика вартість
- Легка інтерпретація зображень
- Використання різних інструментів контрастування при створення зображення
- Відносно проста адаптація та керування

Проте існує кілька істотних недоліків. До таких належать, в першу чергу, необхідність достатнього вакууму для отримання високого розширення (немає можливості досліджувати рідинні об'єкти), відсутність можливості перегляду великих зразків, досягнення атомного розширення в критичних для поверхні умовах, коли енергія пучка електронів досягає величини до 300 кеВ [8].

1.4 Скануюча тунельна мікроскопія

За своєю природою електрон проявляє як хвильові, так і корпускулярні властивості. Його поведінка описується за допомогою рішення рівняння Шредінгера - хвильової функції, квадрат модуля якої характеризує щільність ймовірності знаходження електрона в даній точці простору в даний момент часу. Розрахунки показують, що хвильові функції електронів в атомі відмінні від нуля і за межами сфери, яка відповідає діаметру ефективного перетину атома. Тому при зближенні атомів хвильові функції електронів перекриваються раніше, ніж починає істотно позначатися дія міжатомних сил відштовхування. З'являється можливість переходу електронів від одного атома до іншого. Таким чином, можливий обмін електронами і між двома тілами, що зближують без дотику, тобто без механічного контакту. Для забезпечення спрямованого руху електронів (електричного струму) між такими тілами необхідне виконання двох умов:

- у одного тіла повинні бути вільні електрони, а в іншого - незаповнені електронні рівні, куди могли б перейти електрони;
- між тілами потрібно прикласти різницю потенціалів, і її величина незрівнянно мала в порівнянні з тією, що потрібна для отримання електричного розряду при пробої повітряного діелектричного зазору між двома тілами.

Електричний струм, що виникає при заданих умовах, пояснюється тунельним ефектом і називається тунельним струмом. На практиці явище

тунелювання в СТМ реалізується, коли один з провідників являє собою голку (зонд) , а інший - досліджувану поверхність(Рис. 1.6) [9].

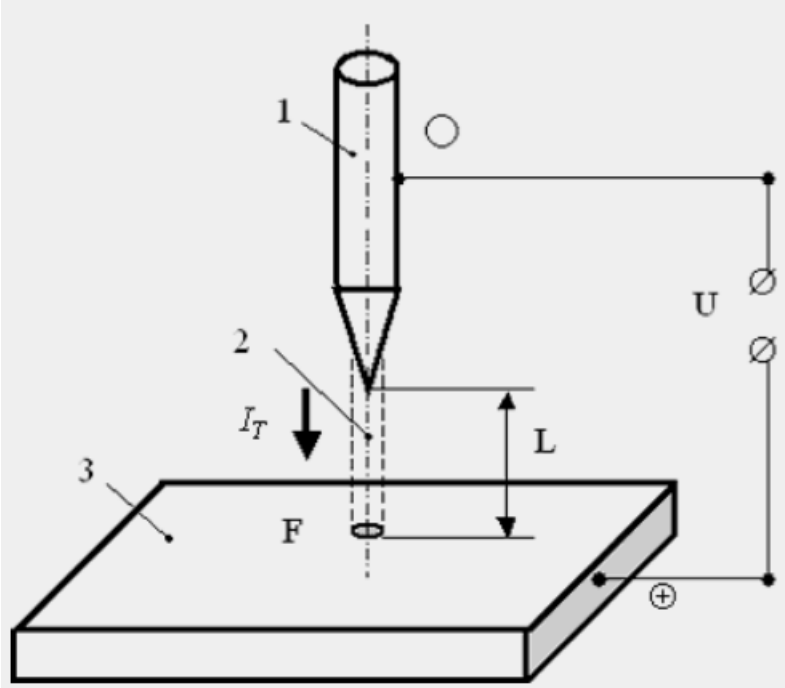


Рис. 1.6 Схема протікання тунельного струму

Принцип роботи мікроскопа заснований на явищі тунелювання електронів через вузький потенційний бар'єр між металевим зондом і провідниковим зразком в зовнішньому електричному полі. Метод скануючої тунельної мікроскопії заснований на квантовому тунелюванні. Голки-зонди зазвичай виготовляють з металевого дроту (наприклад, W, Pt-Ir, Au). Процедура підготовки атомарно гострої голки включає в себе попередню обробку голки ex situ (таку, як механічна поліровка, скол або електрохімічне травлення) і подальшу обробку in situ в високовакуумній (СВВ) камері. Гостра голка мікроскопа підводиться настільки близько до досліджуваної поверхні, що хвильові функції найбільш близького атома голки і атомів поверхні зразка перекриваються. Ця умова виконується при величині проміжку голка-зразок 0,5-2,0 нм. Якщо прикласти напругу між голкою і зразком, то через проміжок

потече тунельний струм [10]. При характерних для СТМ напруженнях від декількох десятків мілівольт до декількох вольт тунельний струм складає від декількох наноампер до часток пікоампер в залежності від зразків. Висока роздільна здатність СТМ в напрямку по нормалі до поверхні визначається експоненціальною залежністю тунельного струму від відстані до поверхні:

$$J_t = \frac{3}{2}\frac{e^2(2m\bar{\varphi})^{\frac{1}{2}}\cdot V}{h^2\cdot \Delta S}\cdot e^{-\frac{4\pi(2m\bar{\varphi})^{\frac{1}{2}}\Delta S}{h}},$$

Де m – маса електрона, e – заряд електрона, $\bar{\varphi}$ – середня робота виходу електрона з матеріалу зонда та зразка, h - постійна Планка, ΔS – ширина потенціального бар’єру. СТМ являє собою електромеханічну систему з негативним зворотним зв'язком, яка підтримує величину тунельного струму між зондом і зразком на заданому рівні [11]. Контроль величини тунельного струму, а, отже, і відстані зонд-поверхні здійснюється за допомогою переміщення зонда уздовж осі, нормальної до поверхні, за допомогою п'єзоелектричного елемента(Рис 1.7).

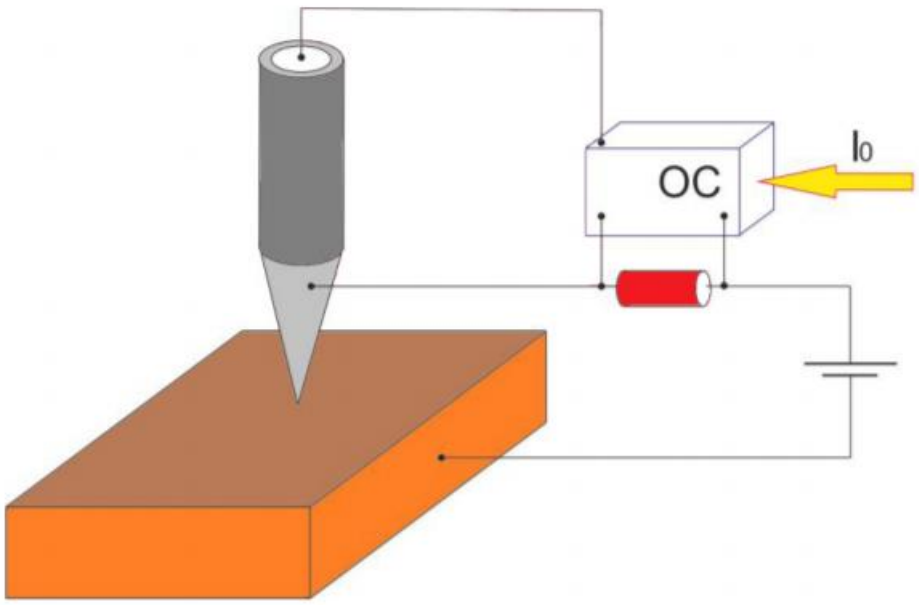


Рис. 1.7 Схема організації зворотного зв’язку по тунельному струму

Зображення рельєфу поверхні в СТМ може формуватися двома методами. За методом постійного тунельного струму зонд переміщається уздовж поверхні, здійснюючи растровое сканування. При цьому зміна напруги на електроді пьезоелемента сканера, за допомогою якого контролюється відстань між зондом і зразком і підтримується постійний струм, відображає рельєф поверхні зразка [11].

Основними перевагами СТМ можна вважати високу чутливість та дешевизну. СТМ навчили не тільки розрізняти окремі атоми, а й визначати їх форму. Скануючі тунельні мікроскопи в стані розпізнавати індивідуальні атоми, а також стало можливим визначення навіть форми окремого атома в реальному просторі (точніше - форми розподілу електронної щільності навколо атомного ядра). Недоліками являється те, що на СТМ неможливо отримати зображення непроводящих матеріалів. Крім того, для якісної роботи тунельного мікроскопа необхідне виконання ряду досить строгих умов, зокрема, роботи в вакуумі і спеціальної підготовки зразка [12].

1.5 Підсумок

В ході літературного огляду основних методів зондової мікроскопії, ознайомлення з перевагами та недоліками кожного з них, було прийнято рішення розробки програмно-апаратного комплексу на основі методу скануючої тунельної мікроскопії. Таке рішення було прийнято після аналізу переваг та недоліків кожного методу. Ціль даної роботи створити тунельний мікроскоп за набагато меншою вартістю, використовуючи сучасну елементну базу та засади програмування.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СКАНУЮЧОЇ ТУНЕЛЬНОЇ МІКРОСКОПІЇ

Робочим органом СТМ служить токопровідна металева голка, яка називається зондом. Зонд підводиться до досліджуваної поверхні на дуже близьку відстань(≈ 0,5 нм) і, при подачі на зонд постійної напруги, між ними виникає тунельний струм, який експоненціально залежить від відстані між зондом і зразком. Це означає, що при збільшенні відстані лише на 0,1 нм тунельний струм зменшується майже в 10 разів! Саме це і забезпечує високу роздільну здатність мікроскопа, оскільки незначні зміни по висоті рельєфу поверхні викликають суттєву зміну тунельного струму. Підтримуючи струм або відстань до поверхні постійними за допомогою системи, що стежить, зонд сканує поверхню, переміщаючись над нею по осях X і Y, то опускаючись, то піднімаючись в залежності від її рельєфу(Рис. 2.1) [13].

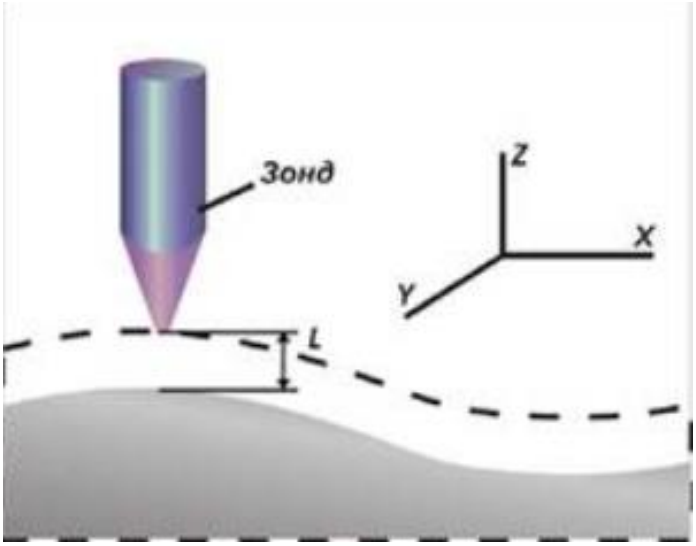


Рис. 2.1 Схема роботи СТМ

Інформація про це переміщення відстежується комп'ютером, і програмно візуалізується щоб дослідник міг побачити на екрані об'єкт з потрібним розширенням.

2.1 Фізичні принципи роботи СТМ

П'єзоелектричний ефект пов'язаний з виникненням електричного поля при додатку механічного зсуву до деяких видів діелектриків. Зворотний п'єзоелектричний ефект, відповідно визначає виникнення механічної напруги і деформації, а, отже, зміна розмірів пьезоелектрика при додатку електричного поля. Деформації S_{jk}, що виникають при цьому в діелектрику, лінійно пов'язані з прикладеним електричним полем E_i та описуються тензором третього рангу - тензором п'єзоелектричних модулів d_{ijk}:

$$S_{jk} = d_{ijk} \cdot E_i$$

Існує кілька фізичних ефектів, які можуть бути використані для переміщення зонда. Однак в даний час для цієї мети застосовується, головним чином, зворотний п'єзоелектричний ефект в поляризованій п'єзокераміці на основі цирконата-титанату свинцю. У вітчизняних конструкціях великого поширення набула п'єзокераміка на основі цирконата-титанату свинцю ЦТС-19. П'єзокераміка являє собою склоподібну матрицю з включеними в неї зернами п'єзоелектричного матеріалу. У процесі спікання кераміки, або після вона піддається впливу електричного поля (поляризується) і стає п'єзоактивною. Відразу після поляризації стан кераміки знаходиться не в рівновазі. Тому для забезпечення достатньої стабільності в часі потрібно її «старіння». Даний процес може протікати від декількох годин при штучному, до 1 року при природному старінні. Після закінчення процесу параметри п'єзокераміки приходять до своїх рівноважних значень, і в подальшому їх стабільність залежить, головним чином, від режимів експлуатації [14].

Тунельний ефект – проходження частинки крізь область простору, перебування в якій заборонено класичною механікою. Найбільш відомий приклад такого процесу - проходження частинки крізь потенційний бар'єр, коли її енергія E менше висоти бар'єру U_0. В класичній фізиці частинка не може виявитися в області такого бар'єру і тим більше пройти крізь неї, оскільки це порушує закон збереження енергії. Однак в квантовій фізиці

ситуація принципово інша. Квантова частка не рухається якоюсь певною траєкторією. Тому можна лише говорити про ймовірність знаходження частинки в певній області простору $\Delta p \nabla x \geq \hbar$. При цьому ні потенційна, ні кінетична енергії не мають певних значень відповідно до принципу невизначеності. Допускається відхилення від класичної енергії E на величину ΔE протягом інтервалів часу Δt, що даються співвідношенням невизначеностей $\Delta E \Delta t \geq \hbar (\hbar = \frac{h}{2\pi}$, де h - постійна Планка). Можливість проходження частинки крізь потенційний бар'єр обумовлена вимогою безперервної хвильової функції на стінках потенційного бар'єру. Імовірність виявлення частинки справа і зліва пов'язані між собою співвідношенням, що залежать від різниці $E - U(x)$ в області потенційного бар'єру і від ширини бар'єру $x_1 - x_2$ при даній енергії (Рис 2.2) [15].

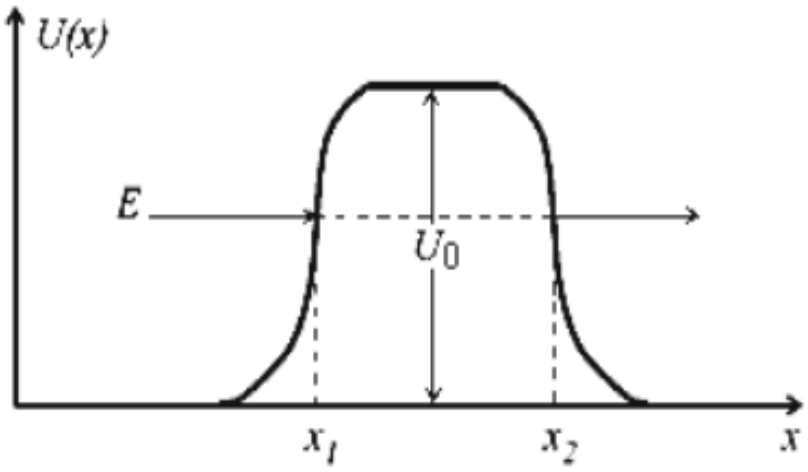


Рис. 2.2 Імовірність тунельного ефекту

$$\int_{x_1}^{x_2} 2m[E - U(x)]^{\frac{1}{2}} dx \geq \hbar$$

Зі збільшенням висоти і ширини бар'єру імовірність тунельного ефекту експоненціально спадає. Імовірність тунельного ефекту також швидко знижується зі збільшенням маси частинки. Проникнення крізь бар'єр носить

імовірнісний характер. Частинка з $E < U_0$, натрапивши на бар'єр, може або пройти крізь нього, або відбитися. Сумарна ймовірність цих двох можливостей дорівнює 1. Якщо на бар'єр падає потік частинок з $E < U_0$, то частина цього потоку буде просочуватися крізь бар'єр, а частина - відбиватися. Тунельне проходження частинки через потенційний бар'єр лежить в основі багатьох явищ ядерної та атомної фізики: альфа-розпад, холодна емісія електронів з металів, явища в контактному шарі двох напівпровідників і т.д [15]. На Рис. 2.3. зображена схема тунелювання електронів через потенційний бар’єр в тунельном мікроскопі.

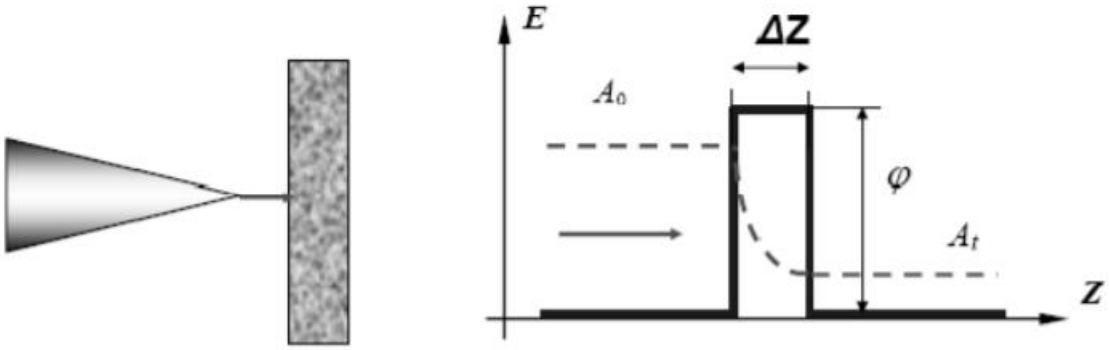


Рис. 2.3 Схема тунелювання електронів

2.2 Конструкція скануючого тунельного мікроскопа

Основними компонентами скануючого тунельного мікроскопа є скануючий зонд, п'єзоелектричний керований сканер висоти (вісь z) і поперечний (осі x і y) сканер, а також механізм грубого наближення зразка до зонда. Мікроскоп управляється спеціальною електронікою і комп'ютером. Система підтримується системою віброізоляції [16]. Схему СТМ зображено на Рис. 2.4.

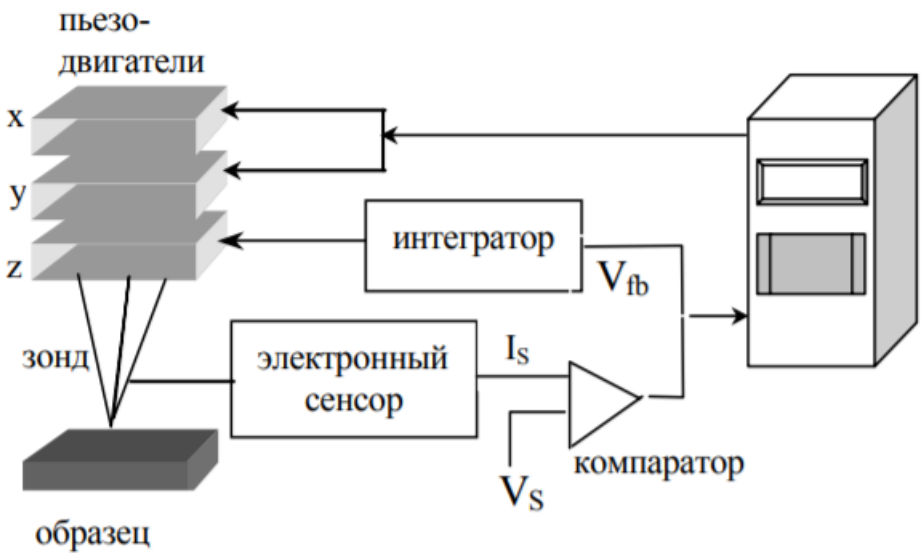


Рис. 2.4 Схема СТМ

Вістрійний зонд. Зонд визначає корисне збільшення мікроскопа. Найбільш важлива характеристика зонда - радіус заокруглення вістря, який впливає на поперечні розміри області гранично досяжного розширення. Зазвичай перевага віддається зондам з меншими значеннями радіусу вістря, хоча іноді поперечні розміри досліджуваних структур цього не вимагають, а складність виготовлення зонда значно підвищується зі зменшенням радіуса вістря. Слід враховувати, що радіус вістря є далеко не єдиною характеристикою зонда. Матеріал визначає стійкість зонда до фізико-хімічних впливів. При використанні зонда в якості інструменту нанотехнології до нього

можуть пред'являтися особливі вимоги по хімічній стійкості, твердості, частоті власних згинальних механічних коливань, механічної міцності, повторюваності геометричної форми і т.п. Підсумовуючи викладене вище, можна сказати, що в кожному конкретному випадку необхідно мати зонд з прийнятним радіусом вістря і з певним набором фізико-хімічних і геометричних параметрів [17]. Матеріал, з якого виготовляють зонд підбирають індивідуально, але зазвичай використовують метали з високою твердістю та хімічною стійкістю, наприклад вольфрам або платина. Основною частиною мікроскопу є сенсор з високим розширенням. Таким сенсором можна виміряти відстань з точністю до 0.01 нм. Тунельний сенсор виміряє струм, що протікає між поверхнею зразку та кінчиком вістря зонда(Рис. 2.5).

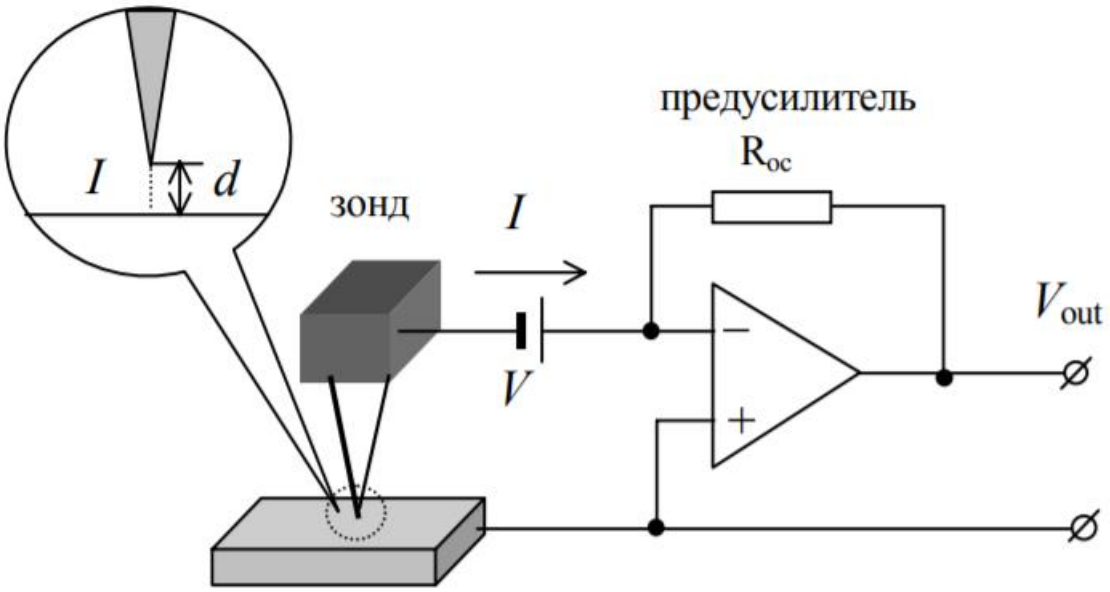


Рис. 2.5 Схема тунельного сенсору

Система управління. Система управління складається з цифрової частини у вигляді набору ЦАП і АЦП, реалізованої на базі персонального

комп'ютера, і аналогової частини, що виконується зазвичай у вигляді окремого блоку.(Рис. 2.6)

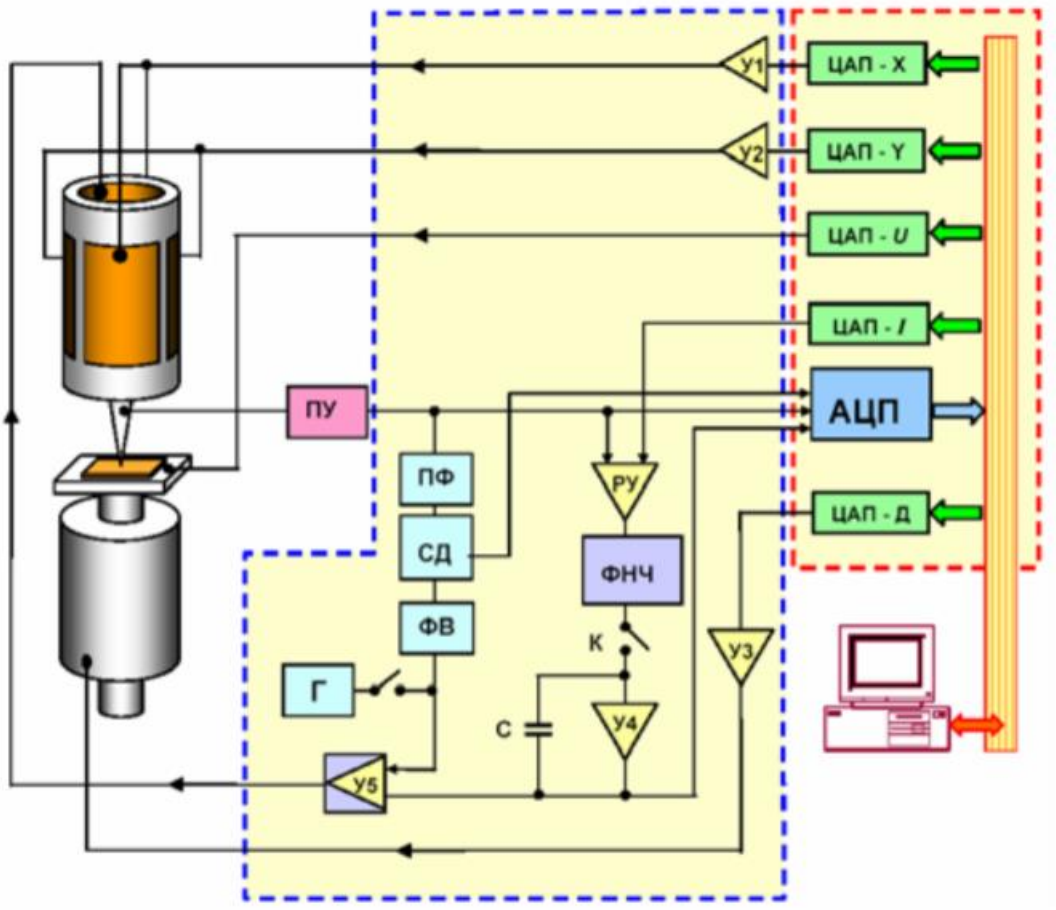


Рис. 2.6 Схема системи управління СТМ

Напруга на тунельному проміжку задається оператором за допомогою ЦАП - U, а підтримуваний системою зворотного зв'язку струм - за допомогою ЦАП - I. Двоканальні цифро-аналогові перетворювачі ЦАП - X і ЦАП – У служать для формування малих і кадрових розгорток. Петля зворотного зв'язку - X і ЦАП - У і двоканальних високовольтних підсилювачів У1 і У2. При скануванні система зворотного зв'язку підтримує постійним тунельний струм. Це відбувається наступним чином. Реальне миттєве значення тунельного струму I_t порівнюється на різницево підсилювачі зі значенням I_0, заданим оператором. Різницевий сигнал $(I_t - I_0)$ посилюється (підсилювачами

У4 і У5) і подається на внутрішній Z-електрод сканера. Таким чином, при скануванні напруга на Z-електроді сканера виявляється пропорційним рельєфу поверхні. Сигнал з виходу підсилювача У4 записується за допомогою АЦП як інформація про рельєф поверхні. Для отримання інформації про розподіл локальної роботи виходу сигнал з генератора Г змішується через підсилювач У5 з напругою на Z-електроді. Відповідна компонента тунельного струму на частоті ω виділяється смуговим фільтром ПФ і детектується за допомогою синхронного детектора СД, на який також подається опорна напруга з задаючого генератора. фаза сигналів синхронізується за допомогою фазовращателя ФВ. Амплітуда струму на частоті ω записується в пам'ять комп'ютера за допомогою АЦП як сигнал, пропорційний локальній роботі виходу [18].

3 ОПИС БУДОВИ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ СТВОРЕНОЇ СТМ

Зовнішній вигляд СТМ, який було спроектовано та виготовлено підчас виконання дипломної роботи, зображений на Рис. 3.1.

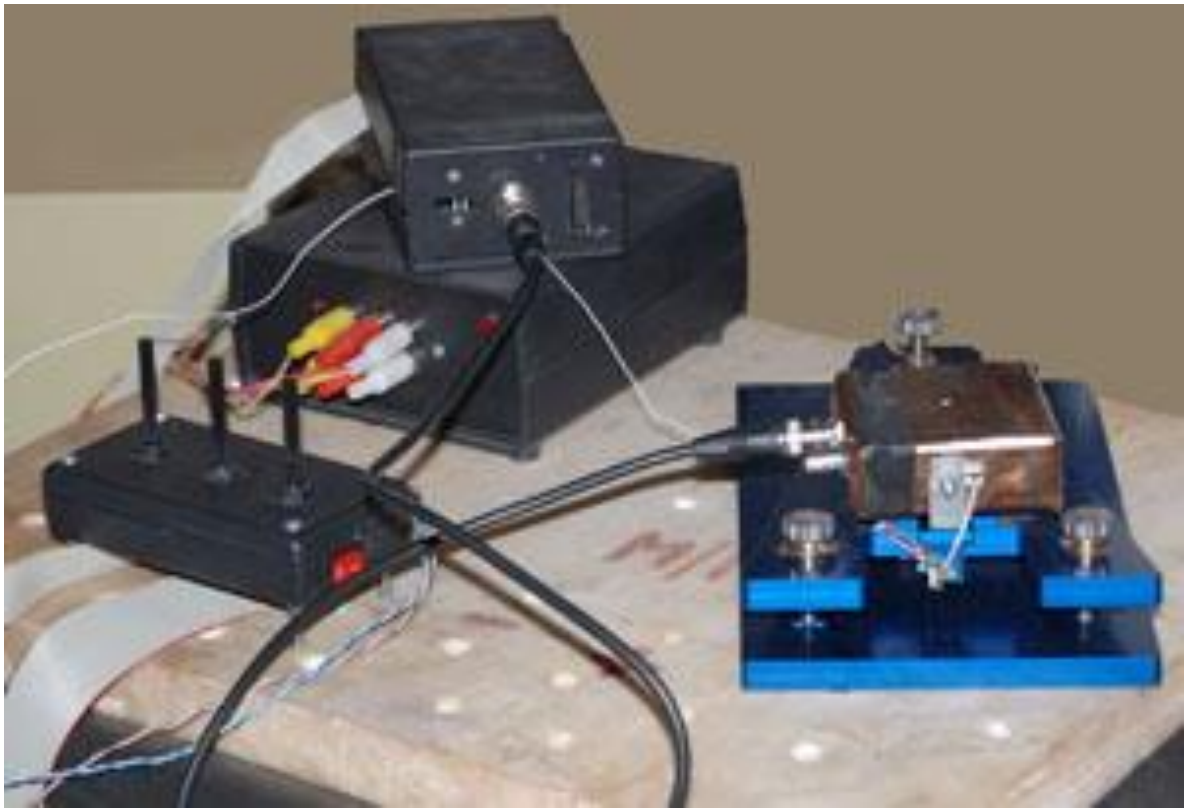


Рис. 3.1 Фотографія СТМ

Створений пристій логічно розділити на дві складові: електронну та механічну частини. Далі наведений стислий опис основних моментів щодо електроніки. Механічна частина грубого позиціонування та підводу голки не є темою даної роботи.

3.1 Електронна частина СТМ

Розроблена електроніка СТМ виконує такі функції:

- забезпечує напругу між вістрям і зразком в діапазоні від кількох мілівольт до одиниць вольт;

- вимірює тунельний струм, що протікає між зразком та вістрям в наноамперному діапазоні;

- забезпечувати керування положенням вістря над поверхнею зразка в залежності від величини тунельного струму;

- забезпечувати переміщення вістря над поверхнею зразка горизонтально в X та Y напрямках в інтервалі від 0 до 5 мкм. На Рис. 3.2. наведено електронні схеми та короткий їх опис.

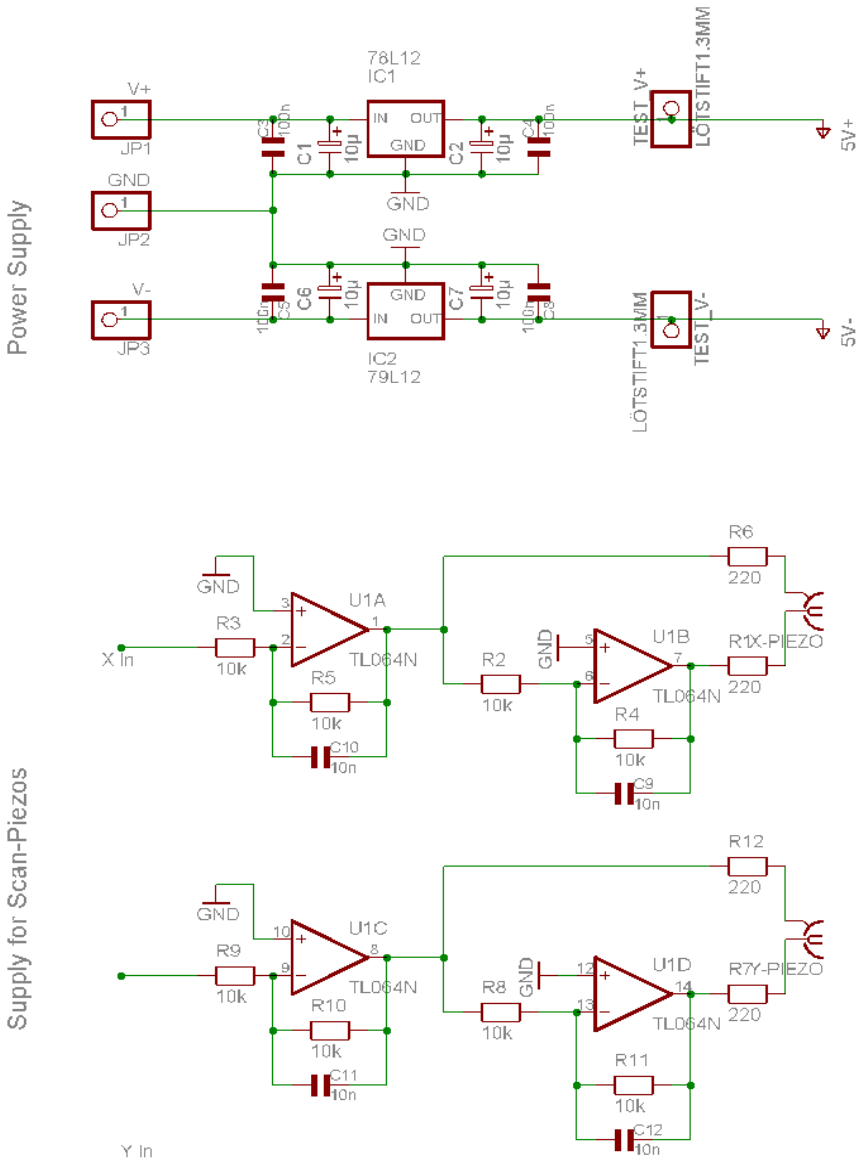


Рис. 3.2 Блок живлення та керування п’єзокристалами.

Блок живлення виконано на мікросхемах 78L12 та 79L12, які забезпечують вискокостабільну напругу для живлення всіх вузлів мікроскопу (Див. рис. 3.2).

Живлення п’єзосканера (Див. рис. 3.2). Система керування X- і Y-п’єзокристалами складаються з двох елементів кожен: 1. U1A і U1C розв'язують комп'ютерні сигнали і п’єзоелементи (операційні підсилювачі з дуже високим вхідним імпедансом) і 2. U1B і D подають симетричну напругу на два електроди п’єзоелемента (від $-X_{in}$ до $+X_{in}$), інвертуючи вихідний сигнал в другому каналі(Рис. 3.3).

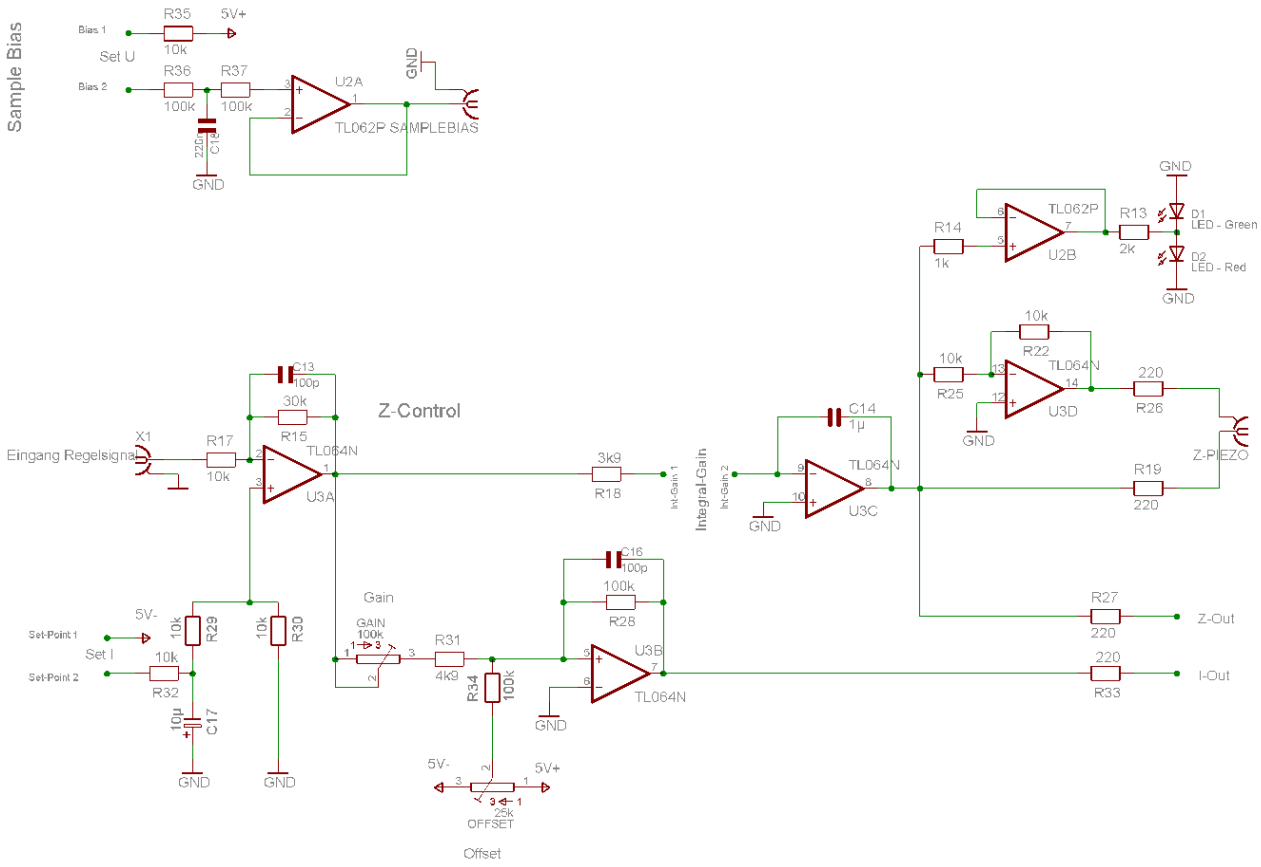


Рис. 3.3 Напруга зсуву на зразку та схема Z-контролю.

Схемне рішення на мікросхемі U2A формує напругу між вістрям і зразком. Величина цієї напруги задається за допомогою параметру Bias на блоці керування.

Z-контроль. U3A отримує сигнал тунельного струму, згладжує високочастотний шум і передає сигнал як додатковий вимірювальний канал (U3B фільтрує сигнал). Коефіцієнт посилення тунельного сигналу може регулюватися і може бути додане постійне зміщення. Для того, щоб підтримувати тунельний струм постійним, положення вістря повинне змінюватися відповідно до зміни струму. Різниця між заданим рівнем і реальним тунельним струмом інтегрується (U3C), і сигнал розузгодження, подається симетрично (U3D) на Z-п'єзоелемент. Швидкість, з якою контролер реагує на зміни струму, може бути задана з використанням інтегрального коефіцієнту посилення (блок керування, Рис. 3.4).

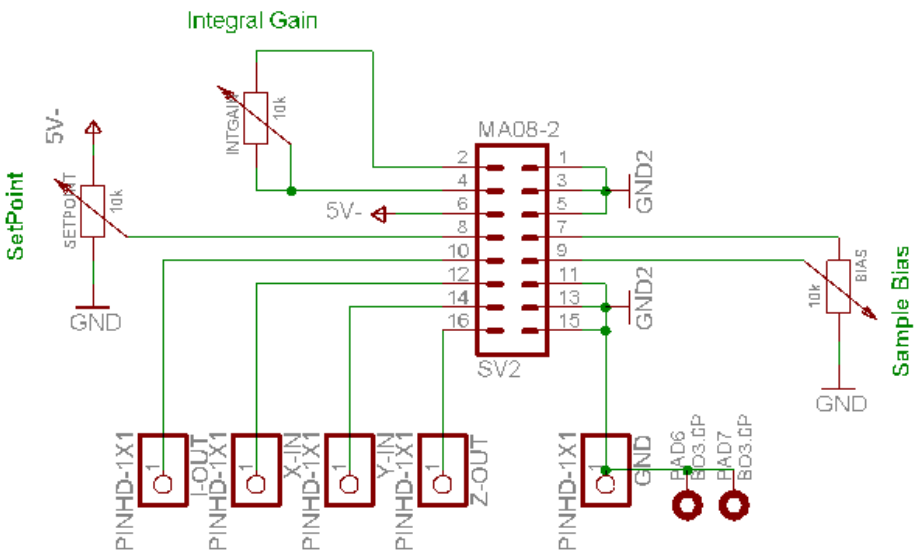


Рис. 3.4 Блок керування

Блок керування (Див. рис. 3.4) дозволяє встановити необхідні параметри для тунельної напруги (Bias), величину тунельного струму (Setpoint) і швидкість реакції електроніки (Integral Gain). На Рис. 3.5. зображено підсилювач.

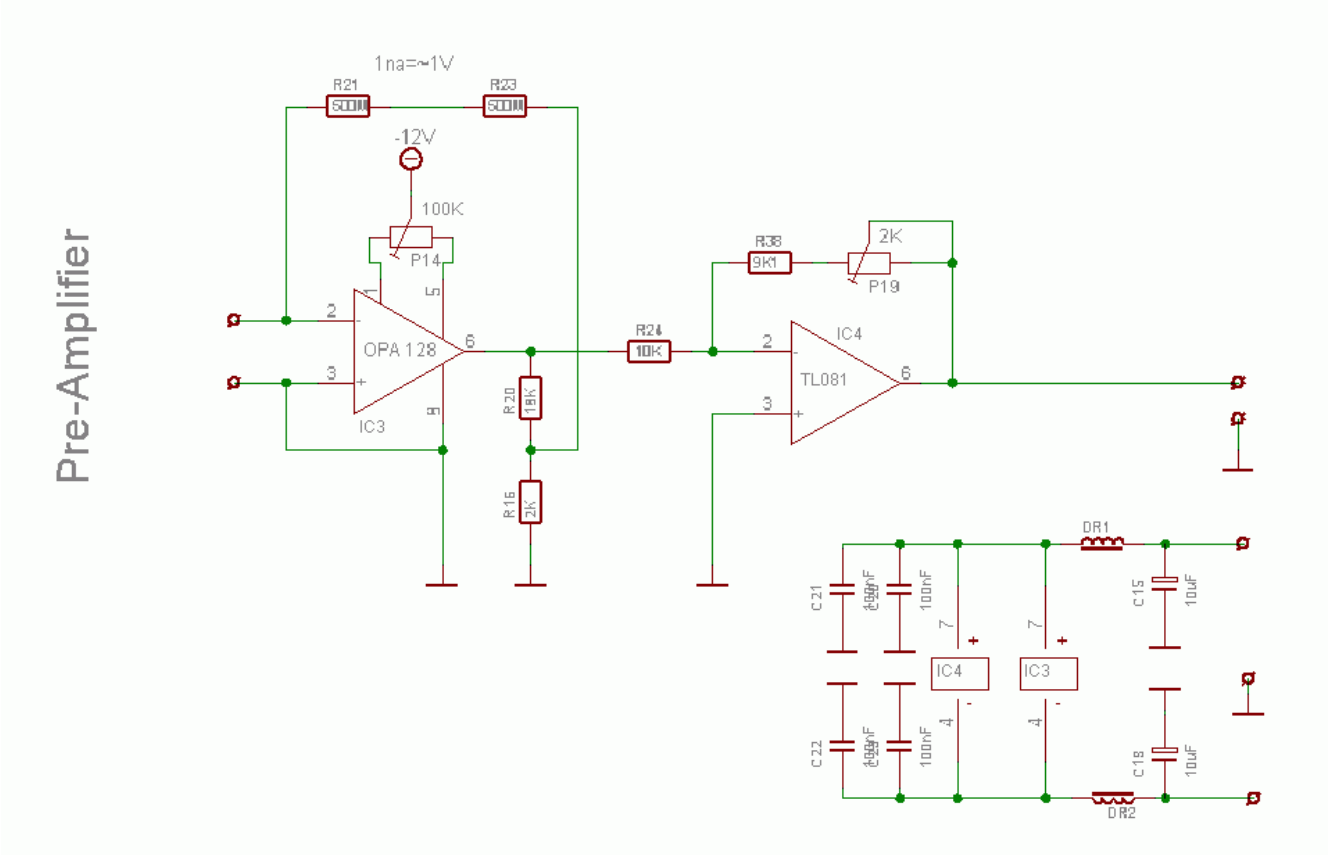


Рис. 3.5 Підсилювач

Тунельний струм має значення в наноамперному діапазоні, тому , для його підсилення та перетворення на напругу (напруга менш чутлива до зовнішніх перешкод) застосовується операційний підсилювач з високим вхідним імпедансом та коефіцієнтом підсилення постійного струму рівним 10^8 разів (Див. рис. 3.5). Такі величезні значення коефіцієнту підсилення вимагають розташування цього блоку як можна ближче до вістря.

3.2 Випробування створеного пристрою

З метою тестування можливостей зібраного СТМ було проведено сканування поверхні піролітичного графіту (рис. 3.6). При цьому роздільна здатність мікроскопу по вісям X та Y визначається насамперед точністю позиціювання вістря за допомогою п’єзоелектричних маніпуляторів.

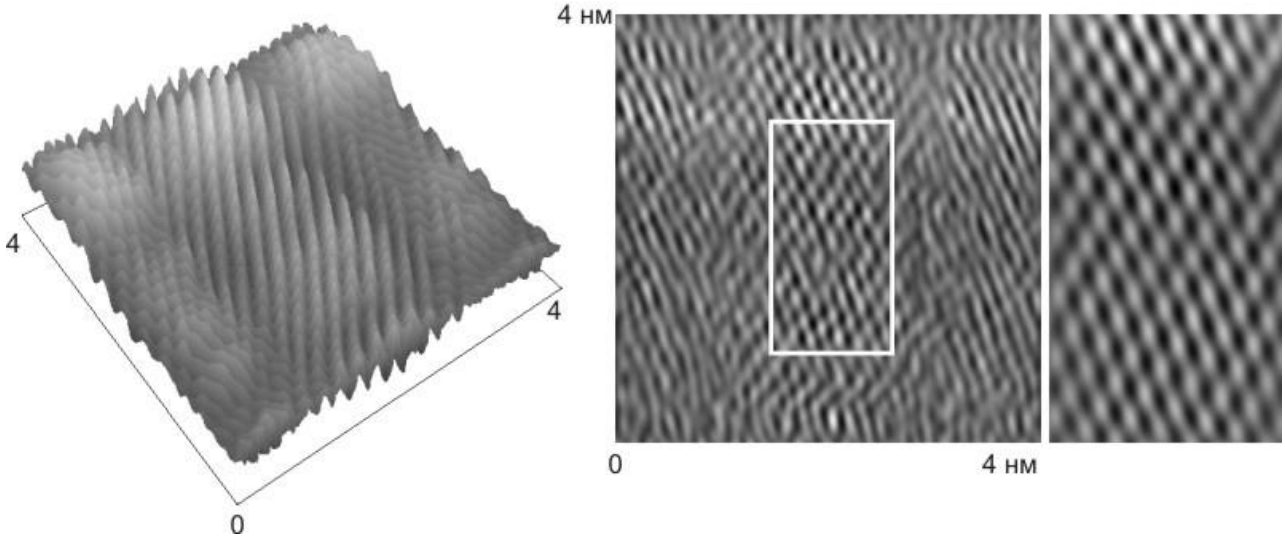


Рис. 3.6 СТМ зображення поверхні графіту (0001). Метод постійної висоти. (тунельний струм 5нА, напруга на зразку 1мВ)

За розрахунками на поверхні зразка роздільно спостерігаються атоми, рознесені не менше, ніж на ~0,4 нм. Підкреслимо, що даний результат досягнений на відкритому повітрі. Очікується, що якщо зразок разом із СТМ помістити в умови вакууму, то результат можна покращити.

ВИСНОВКИ

Підчас виконання дипломної роботи були спроектовані схемні рішення та зібраний прототип СТМ, який працює в умовах атмосфери. Прилад має наступні характеристики:

- при скануванні зразку працює в режимі постійної висоти та вимірює змінний тунельний струм;
- вимірює тунельний струм, що протікає між зразком та вістрям в наноамперному діапазоні;
- забезпечує напругу між вістрям і зразком в діапазоні від кількох мілівольт до одиниць вольт;
- забезпечує розміри області сканування 5мкм на 5 мкм.

Розроблений пристрій протестовано при скануванні поверхні піролітичного графіту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J. Tersoff and D. R. Hamann – Theory and application for scanning tunneling microscope. // Phys. Rev. Lett. v. 50, p. 1998-2001 (1983).
2. В.Л.Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии . М: Техносфера 2004г, 143с.
3. В.Л.Миронов Магнитно-резонансная силовая микроскопия ферромагнитных наноструктур. Н.Н: 2016г, 43с.
4. http://www.ckpgene.ru/left/atomno-silovaya_mikroskopiya/
5. Д.Багров, И.Яминский, О.Шабурова А.Феофанов, К.Шайтан. Электросиловая микроскопия наноразмерных объектов//Наноіндустрія. - №1, 2011г. – с.1 – 4.
6. М.М.Криштал, И.С.Ясников, В.И.Полунин, А.М.Филатов,, А.Г.Ульяненков. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения *Серия -Мир физики и техники½ КК/35) // Издательство Техносфера. Москва, 222;0 228 с.
7. Ю.С.Нагорнов, И.С.Ясников, М.Н.Тюрьков. Способы исследования поверхности методами атомно-силовой и электронной микроскопии. Учебное пособие.2012г. 59с.
8. http://www.nanoscopy.org/tutorial/onlinetest/polymer/5.htm
9. http://lab.bmstu.ru/stm/Parts1/Parts2/index.htm
10. https://thesaurus.rusnano.com/wiki/article1691#
11. А.Е.Петухов. Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия. 10с. URL: https://surface.spbu.ru/images/data/SPM.pdf
12. https://studfile.net/preview/3306351/
13. http://labs.vt.tpu.ru/nano/instruments.htm
14. Е.Г.Дедкова, А.А.Чуприк, И.И.Бобринецкий, В.К.Неволин. «Приборы и методы зондовой микроскопии». М: Учебное пособие. 2011г., 150с.
15. http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e169.htm

16. https://ru.qaz.wiki/wiki/Scanning_tunneling_microscope#External_links
17. https://obuchalka.org/2014042877077/pribori-i-metodi-zondovoi-mikroskopii-dedkova-e-g-chuprik-a-a-bobrineckii-i-i-nevolin-v-k-2011.html
18. Д.А.Усанов, Р.К.Яфаров. Исследование поверхности материалов методом сканирующей туннельной микроскопии. С: Учебное пособие. 2007г., 28с.
19. В.А.Мошников, Ю.М.Спивак, П.А.Алексеев, Н.В.Пермяков. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.