

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Неруйнівний контроль

Неруйнівний контроль (скорочено НК) — контроль властивостей і параметрів об'єкта, не руйнуючи його та при якому не повинна бути порушена придатність об'єкта до використання та експлуатації.

Для НК використовуються різноманітні фізичні явища або процеси, що при певних умовах не завдають шкоди об'єктові контролю (ОК), або ж не впливають на його експлуатаційні характеристики.

Згідно з ДСТУ 2865—94, НК — контроль якості продукції, за якого не повинна бути порушена придатність щодо застосування із повним збереженням закладених із самого початку функцій.

Неруйнівним контролем також називається оцінка надійності неруйнівними методами або перевіркою без руйнування виробу. НК особливо важливий при створенні та експлуатації життєво важливих виробів та об'єктів, компонентів і конструкцій. Для виявлення різних дефектів використовуються різні методи НК, такі як рентгенівські промені, на знімках з використанням яких добре видно дефекти (тріщини, непровари, шлакові чи газові включення, підрізи, пори, раковини, тріщини, бризки металу) зварювального шва. Ще одним різновидом НК є ультразвукова дефектоскопія, де різноманітні дефекти проявляють себе відбитими імпульсами. Написане вище стосувалося промислового НК, проте багато з таких методів можуть успішно застосовуватися і відносно живих істот, і в першу чергу до людини. У той же час широко відомі факти і зворотного «проростання» медицини в промисловість. Це, наприклад, метод ультразвукових фазованих ґраток або комп'ютерна радіографія.



Система ультразвукового контролю двигуна V2500

Існує також і поняття руйнівного контролю. Наприклад, точно виміряти міцність на розрив якогось об'єкта можна тільки шляхом прикладання руйнівного навантаження, після чого об'єкт вже не буде придатний до використання. Такий контроль звичайно застосовують тільки до кількох об'єктах з партії, щоб визначити, що в цій партії не було порушень технологій виробництва. Зрозуміло, що такий контроль дуже економічно витратний.

Види та методи НК

Види НК

Акустичний контроль

Вихрострумовий контроль

Радіохвильовий контроль

Радіаційний контроль

Електричний контроль

Тепловий контроль

Оптичний контроль

Газорозрядна візуалізація

Органолептичний контроль

Візуальний контроль

Електрогазодинамічний

контроль

Магнітний контроль

Контроль проникаючими

речовинами

Методи НК

За характером взаємодії фізичних полів або речовин з об'єктами контролю

Метод розсіяного, відбитого
проникаючого випромінювання;

Електричний метод;

За первинним інформативним параметром

Амплітудний метод;

Часовий метод;

Геометричний метод;

Газовий та рідинний методи;

Метод коерцетивної сили

Метод намагніченості;

Метод магнітної проникності;

Метод напруженості;

Метод залишкової індукції;

За способом отримання первинної
інформації

Акустичний метод

Індукційний метод;

Іонізаційний метод;

Метод термофарб;

Порошковий метод;

Радіоактивний метод;

ОСНОВИ скануючої зондової мікроскопії

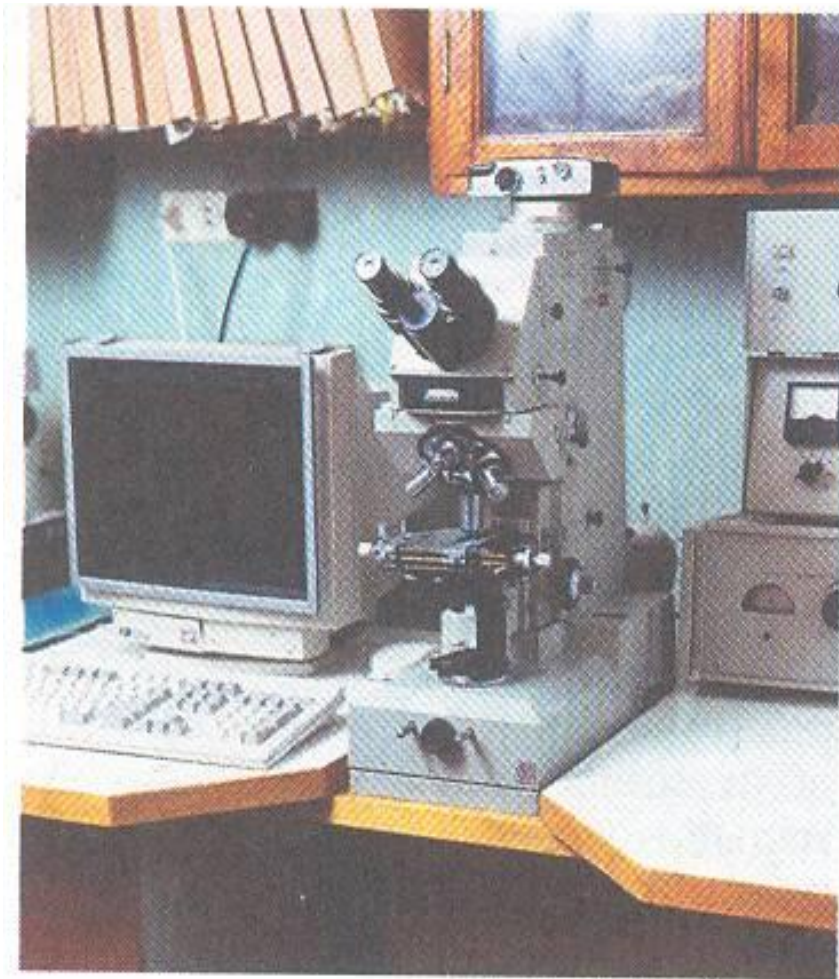
НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ ОСНОВНІ

- 1. В.Л. Миронов "Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений", Нижний Новгород, РАН ИФМ, 2004, 114.**
- 2. В.К.Неволин "Основы туннельно-зондовой нанотехнологии: Учебное пособие", Москва, МГИЭТ (ТУ), 1996, 91 с.**
- 3. С.А.Рыков "Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур", СПб, Наука, 2001, 53 с.**
- 4. Р.З. Бахтизин, Р.Р.Галлямов "Физические основы сканирующей зондовой микроскопии", Уфа, РИО БашГУ, 2003, 82с.**
- 5. В.С.Эдельман – Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии. // Приборы и техника эксперимента, № 1, с. 24 – 42 (1991).**
- 6. С.Н.Магонов Сканирующая силовая микроскопия полимеров и родственных материалов. // Высокомолекулярные соединения, т. 38, № 1, с. 143 – 182 (1996).**
- 7. В.А.Быков, М.И.Лазарев, С.А.Саунин - Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности. // “Электроника: наука, технология, бизнес”, № 5, с. 7 – 14 (1997).**
- 8. "Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров" (Под редакцией И. В.Яминского), М.: Научный мир, 1997, 86 с.**
- 9. А.П.Володин Новое в сканирующей микроскопии. // Приборы и техника эксперимента, № 6, с. 3 – 42 (1998).**
- 10. Голдстейн Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. - М.: Мир. – 1984. – Кн.1. – 303 с.**
- 11. V. Koutsos, E. Manias, G. ten Brinke, and G. Hadziioannou, Atomic force microscopy and real atomic resolution. Simple computer simulations // Europhys. Lett., -1994, - v. 26, - No 3, - pp. 103-107.**

ДОДАТКОВІ

1. G.Binnig, C.F.Quate, Ch.Gerber Atomic force microscope. // Phys. Rev. Lett., v. 56, № 9, p. 930 – 933 (1986).
2. Ю.С.Бараш "Силы Ван-дер-Ваальса", М: "Наука", 1988, 344 с.
3. M.Saint Jean, S.Hudlet, C.Guthmann, J.Berger Van der Waals and capacitive forces in atomic force microscopies. // J. Appl. Phys., v. 86 (9), p. 5245 – 5248 (1999).
4. S.N.Magonov, V.Elings, M.-H.Whangbo Phase imaging and stiffness in tapping-mode atomic force microscopy. // Surf. Sci., 375, L385 – L391 (1997).
5. J.P.Cleveland, B.Anczykowski, A.E.Schmid, V.B.Elings Energy dissipation in tapping mode atomic force microscopy. // Appl. Phys. Lett. V. 72 (20), 2613 – 2615 (1998).
6. J.Tamayo, R.Garcia Relationship between phase shift and energy dissipation in tapping-mode atomic force microscopy. // Appl. Phys. Lett. V. 73 (20), 2926 – 2928 (1998).
7. D.W.Pohl, W.Denk, M.Lanz Optical spectroscopy: image recording with resolution./20. // Appl. Phys. Lett., v. 44, p. 651 – 653 (1984).
8. H.K.Wickramasinghe Progress in scanning probe microscopy. // Acta materialia, 48, p. 347-358 (2000).
9. Галлямов М.О., Яминский И.В. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих эффектов, Види атомно-силових мікроскопів. (Интернет-сайти <http://www.ntmdt.ru/>).
9. Галлямов М.О., Яминский И.В. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих эффектов, Види атомно-силових мікроскопів. (Интернет-сайти <http://www.ntmdt.ru/>, <http://www.nanoscopy.org/>)
10. U.Durig, D.W.Pohl, F.Rohrer – Near-field optical-scanning microscopy. J.Appl. Phys. 59 (10) 3318-3327.
11. M. Komiyama, S. Ohkubo, K. Tazawa, K. Tsujimichi, A. Hirotani, M. Kubo, and A. Miyamoto, Effect of atomic arrangement at tip apex and tip-sample distance on atomic force microscopy images: a simulation study // Jpn. J. Appl.

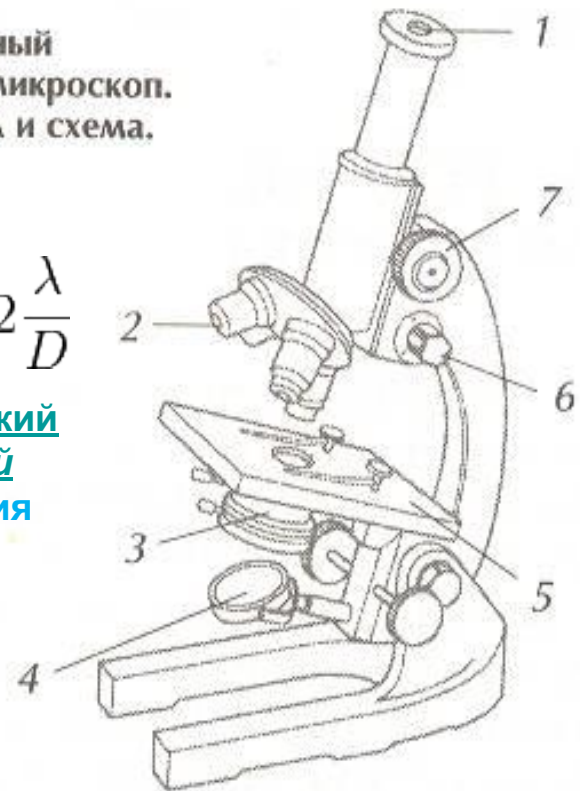
СВІТЛОВІ МІКРОСКОПИ



Современный
световой микроскоп.
Общий вид и схема.

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

эмпирический
критерий
разрешения
Рэля



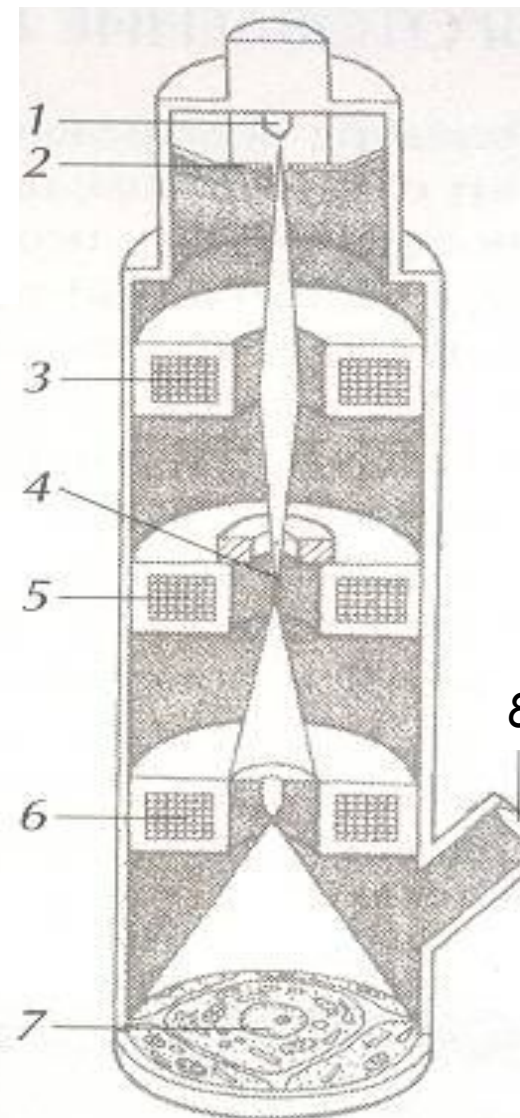
1 — окуляр; 2 — сменные объективы;
3 — конденсор; 4 — зеркало; 5 — предметный
столик; 6 — винт тонкой настройки; 7 — винт
грубой настройки.

Разрешение оптических приборов принципиально ограничено дифракциейРазрешение оптических приборов принципиально ограничено дифракцией на объективеРазрешение оптических приборов принципиально ограничено дифракцией на объективе: видимые точки являются ничем иным, как дифракционными пятнами. Две соседние точки разрешаются, если минимум интенсивности между ними достаточно мал, чтобы его разглядеть. Для снятия зависимости от субъективности восприятия был введен эмпирический критерий разрешения Рэля, который определяет минимальное угловое расстояние между точками $\sin \theta = 1,22 \lambda / D$ где θ — угловое разрешение (минимальное угловое расстояние), λ — длина волны, D — диаметр входного зрачка оптической системы (часто он совпадает с диаметром объектива). Учитывая

ЕЛЕКТРОННІ МІКРОСКОПИ

$$\lambda = h / mv$$

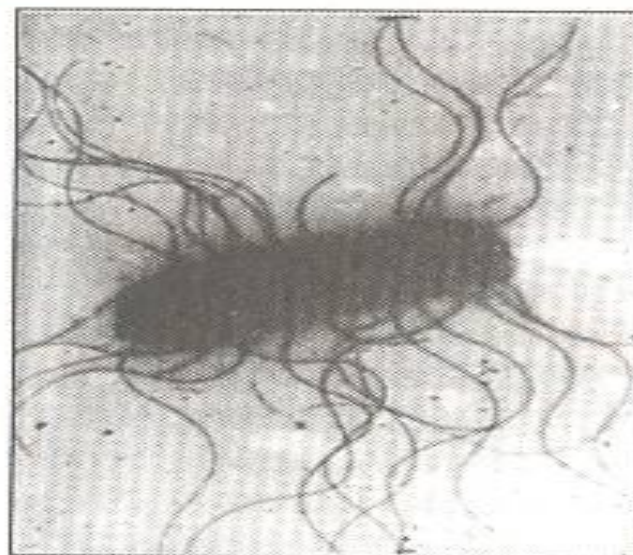
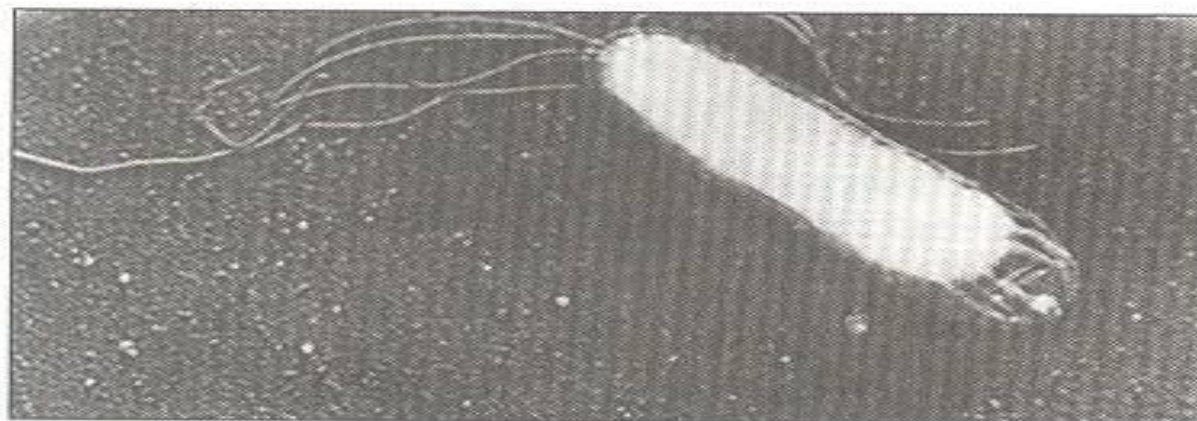
ПРОСВІЧУЮЧИ-
РОЗДІЛЬНА
ЗДАТНІСТЬ ~ 0,1 нм
РАСТРОВІ-
ДІАМЕТР ПУЧКА ~ 5 нм



Електронний мікроскоп. Общий вид и упрощённая схема.

1 — катод; 2 — анод; 3 — конденсор; 4 — препарат (чёрная точка); 5 — объектив;
6 — проектор; 7 — флуоресцентный экран; 8 — окуляр.

ЕЛЕКТРОННО-МІКРОСКОПІЧНІ ЗОБРАЖЕННЯ ЖГУТИКОВИХ БАКТЕРІЙ



Тема I. Техніка скануючої зондової мікроскопії

1.1. Принципи роботи скануючих зондових мікроскопів

Скануючий тунельний мікроскоп (СТМ) – перший із сімейства зондових мікроскопів - був винайдений в 1981 році швейцарськими вченими Гердом Біннігом і Генріхом Рорером. В 1986 році за створення тунельного мікроскопу Г. Біннігу и Г. Рореру було присуджено Нобелівську премію по фізиці .

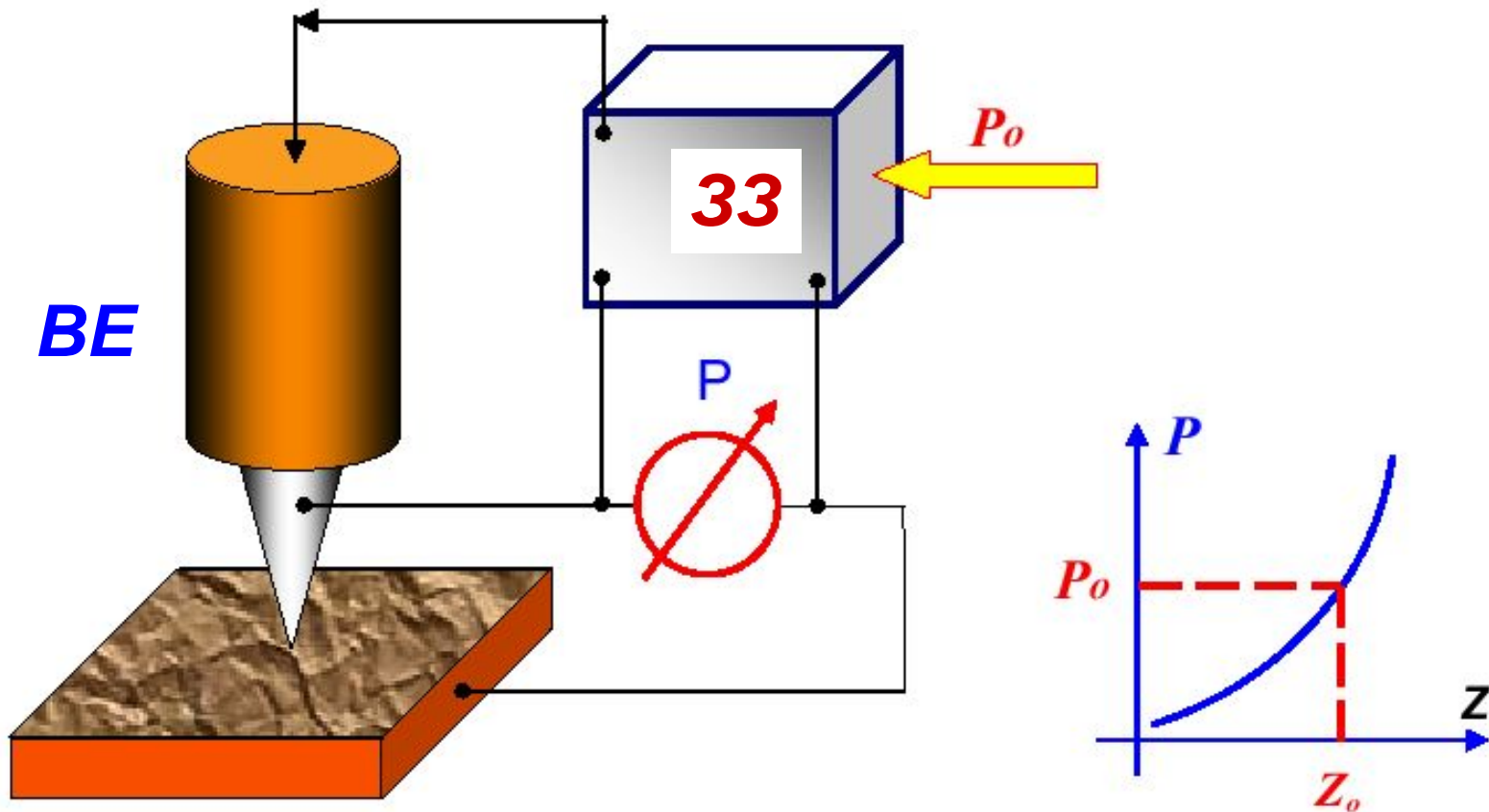


Рис. 1. Схема організації системи зворотнього зв'язку зондового мікроскопу

Система зворотнього зв'язку підтримує значення параметра P постійним, рівним величині P_0 , заданної оператором. Якщо відстань зонд-поверхня змінюється (наприклад, збільшується, то відбувається зміна (збільшення) параметра P . В системі ЗЗ формується різничний сигнал, пропорційний величині $P = P - P_0$, який підсилюється до потрібної величини і подається на виконавчий елемент BE .

Для отримання СЗМ зображення здійснюють спеціальним чином організований процес сканування зразка. При скануванні зонд спочатку рухається над зразком вздовж певної лінії (строчна розвертка), при цьому величина сигналу на виконавчому елементі, пропорційна рельєфу записується в пам'ять комп'ютера. Потім зонд повертається в початкову точку і переходить на наступну строчку сканування (кадрова розвертка), і процес повторюється. Записаний таким чином при скануванні сигнал зворотнього зв'язку оброблюється комп'ютером, і потім СЗМ зображення рельєфа поверхні $Z = f(x, y)$ будується за допомогою засобів комп'ютерної графіки.

ТЕНЗОР

ТЕНЗОР в математике - величина, обладающая компонентами в каждой из заданного множества систем координат, причем компоненты при переходе от одной системы координат к другой преобразуются по определенному закону. Тензорное исчисление, или "абсолютное дифференциальное исчисление", позволяет ученым формулировать и рассматривать общековариантные физические законы, остающиеся в силе при переходе от одной системы координат к другой. Тензоры определяются в геометрических пространствах любого числа измерений и играют важную роль в дифференциальной геометрии, квантовой механике, небесной механике, механике жидкостей, теории упругости и особенно в общей теории относительности. Частными случаями тензоров являются векторы и скаляры. Основы тензорного исчисления были заложены в работах К.Гаусса (1777-1855) по геометрии поверхностей. Г.Грассман (1809-1877) расширил теорию чисел, включив в нее тензорную алгебру, а Б.Риман (1826-1866), используя гауссовы внутренние координаты, превратил n -мерные многообразия в главный объект своей новаторской работы по основаниям геометрии. Важный шаг к созданию общего тензорного исчисления сделал Э.Кристоффель (1829-1900) в своих работах по преобразованиям (эквивалентности) дифференциальных квадратичных форм. В 1890-х годах итальянский геометр Г.Риччи-Курбастро (1853-1925) и его бывший ученик Т.Леви-Чивита (1873-1941) обобщили и систематизировали результаты своих предшественников. Плодом их совместных усилий стал опубликованный в 1900 курс тензорного исчисления.

1.2. Скануючі елементи (сканери) зондових мікроскопів

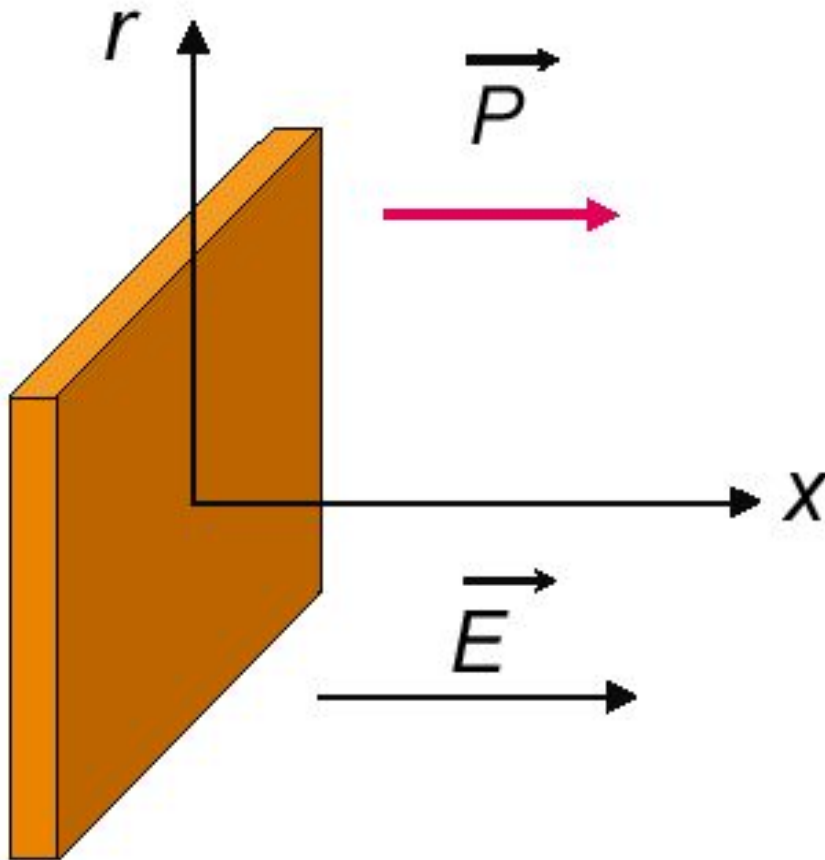


Рис. 2. Пластина із п'зокераміки в зовнішньому електричному полі

П'зоелектрики змінюють свої розміри в зовнішньому електричному полі.

Рівняння зворотнього п'езоефекта для кристалів записується в вигляді:

$$U_{ij} = d_{ijk} E_k$$

де U_{ij} - тензор деформацій ,
 E_k - компоненти електричного поля , d_{ijk} - компоненти тензора п'єзоелектричних коефіцієнтів.

$$\begin{aligned} U_{xx} &= d_{\parallel} E_x \\ U_{rr} &= d_{\perp} E_x \end{aligned}$$

Мы говорим, что поляризация линейно зависит от поля; поэтому если у нас есть электрическое поле E с компонентами x , y и z то x -компонента поляризации P будет суммой трех P_x , определенных уравнениями $P_x = a_{xx}E_x, P_y = a_{yx}E_x, P_z = a_{zx}E_x$; $P_x = a_{xy}E_y, P_y = a_{yy}E_y, P_z = a_{zy}E_y$ и $P_x = a_{xz}E_z, P_y = a_{yz}E_z, P_z = a_{zz}E_z$. Другими словами, P записывается в виде матрицы.

$$\begin{aligned} P_x &= \alpha_{xx}E_x + \alpha_{xy}E_y + \alpha_{xz}E_z, \\ P_y &= \alpha_{yx}E_x + \alpha_{yy}E_y + \alpha_{yz}E_z, \\ P_z &= \alpha_{zx}E_x + \alpha_{zy}E_y + \alpha_{zz}E_z. \end{aligned} \quad (31.4)$$

Диэлектрические свойства кристалла, таким образом, полностью описываются девятью величинами ($a_{xx}, a_{xy}, a_{xz}, a_{yz}, \dots$), которые можно записать в виде символа a_{ij} . (Индексы i и j заменяют одну из трех букв: x , y или z .) Произвольное электрическое поле E можно разложить на составляющие E_x, E_y и E_z . Зная их, можно воспользоваться коэффициентами a_{ij} и найти P_x, P_y и P_z , которые в совокупности дают полную поляризацию P . Набор девяти коэффициентов a_{ij} называется *тензором* — в данном примере *тензором поляризуемости*. Точно так же как три величины (E_x, E_y, E_z) «образуют вектор E », и мы говорим, что девять величин ($a_{xx}, a_{xy}, \dots$) «образуют тензор a_{ij} ».

Скануючі елементи (сканери) зондових мікроскопів

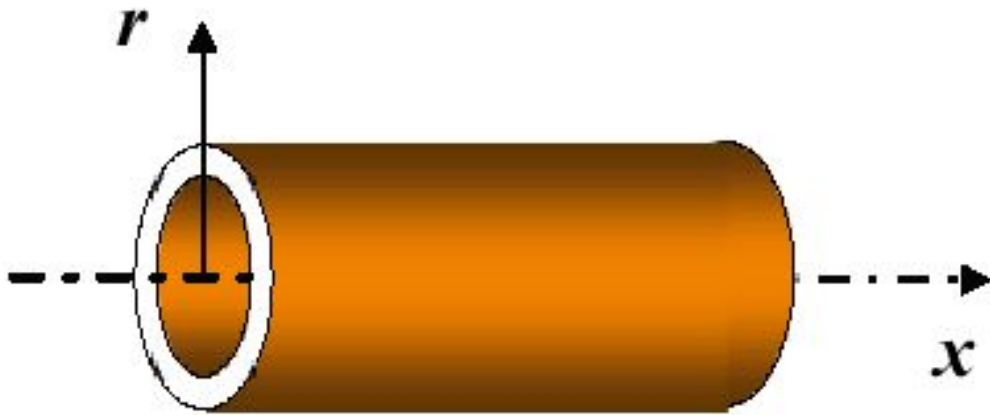


Рис. 3. Трубчастий п'єзоелемент

$$U_{xx} = \Delta x / l_0 = d_{\perp} E_r ,$$

$$\Delta x = d_{\perp} (l_0 / h) V$$

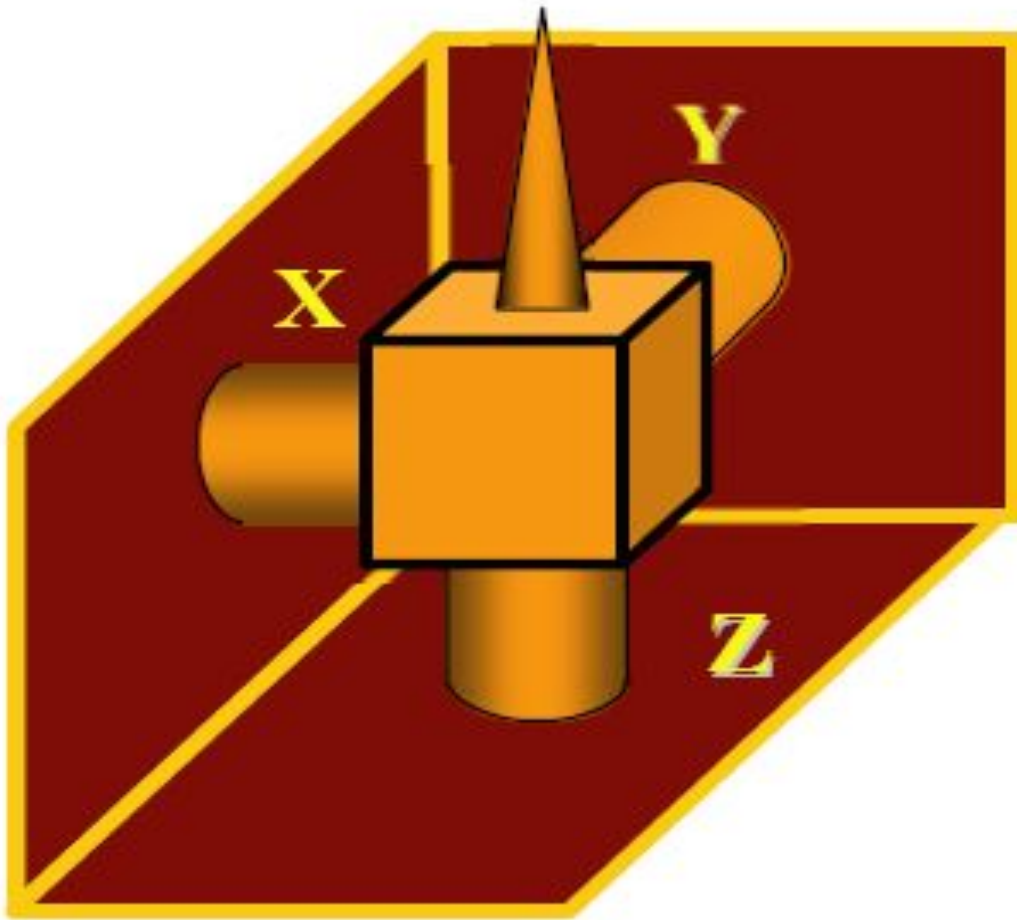
l_0 – довжина трубки в недеформованому стані,

Δx – абсолютне видовження п'єзотрубки,

h – товщина стінки п'єзотрубки,

V – різниця потенціалів між внутрішнім і зовнішнім електродами

Скануючі елементи (сканери) зондових микроскопів



Недоліками такого
сканера є
складність
виготовлення і
сильна
асиметрія
конструкції.

Рис. 4. Сканучий елемент у вигляді трипода, зібраний на
трубчастих п'єзоелементах

На сьогоднішній день в скануючій зондовій мікроскопії найбільш широко використовуються сканери, виготовлені на основі одного трубчастого елемента.

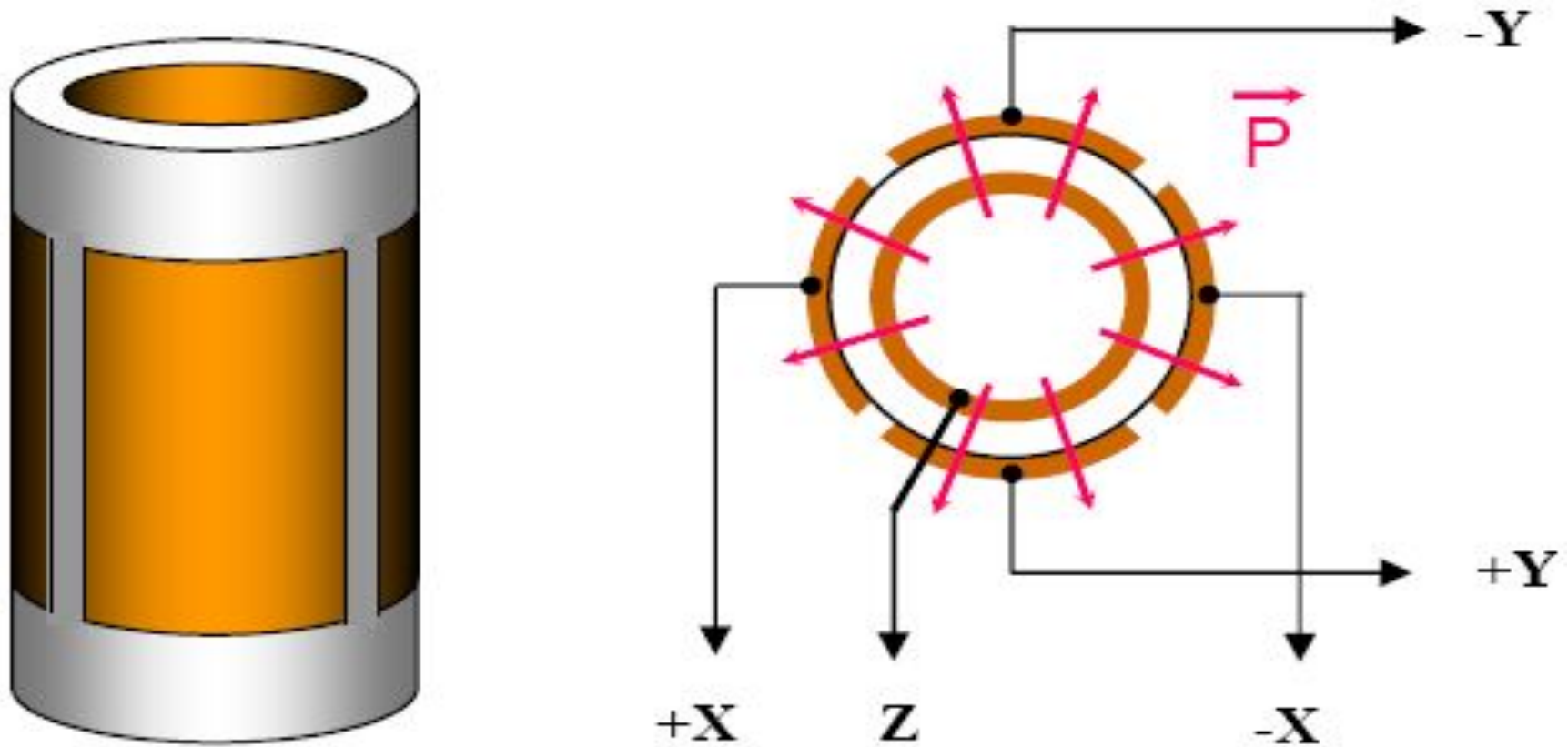


Рис. 5. Трубчастий п'єзосканер

Матеріал трубки має радіальний напрямок вектора поляризації.

Біморфні п'єзоелементи

Широке розповсюдження отримали також сканери на основі біморфних п'єзоелементів. Біморф являє собою дві пластини п'єзоелектрика, склеєні між собою таким чином, що вектор поляризації в кожній з них направлений в протилежні сторони (рис. 6). Якщо подати напругу на електроди біморфа, як показано на рис. 6, то одна із пластин буде розширюватися, а друга зжиматися, що приведе до вигину всього елемента.

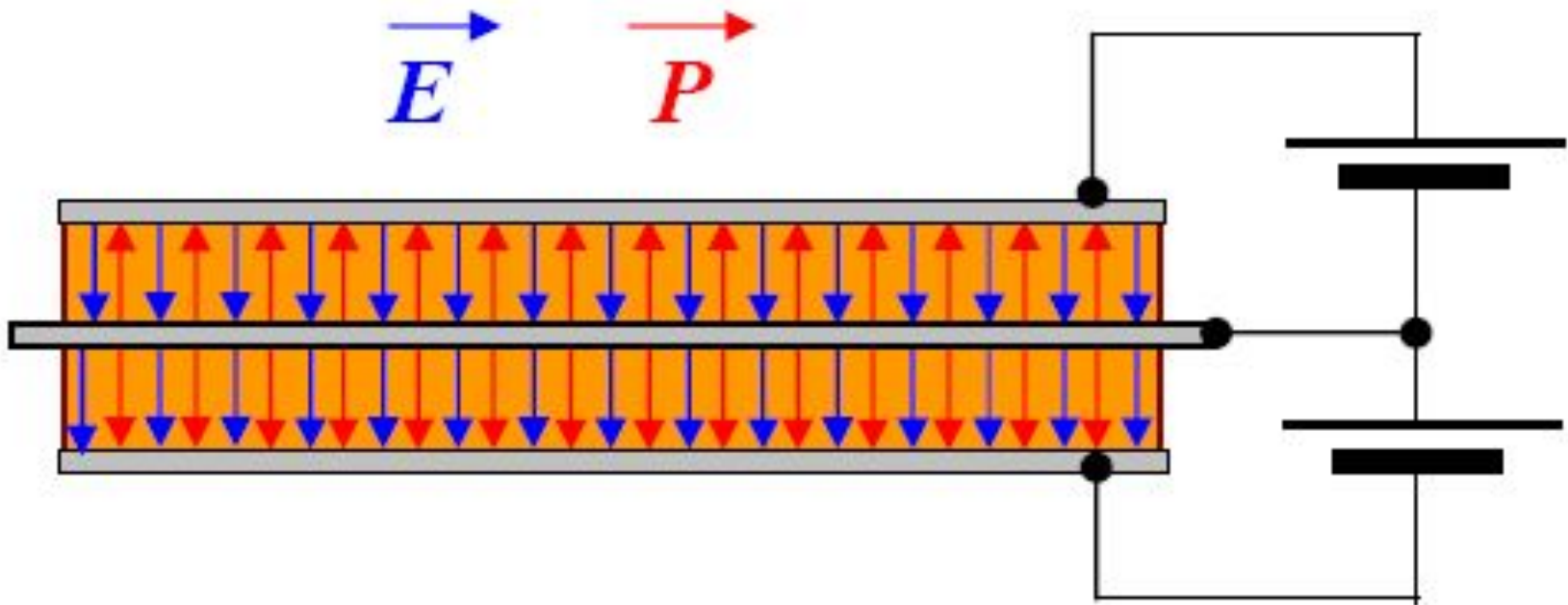


Рис. 6. Будова біморфного п'єзоелемента

Трипод

Поєднуючи три біморфних елементи в одній конструкції, можна реалізувати трипод на біморфних елементах.

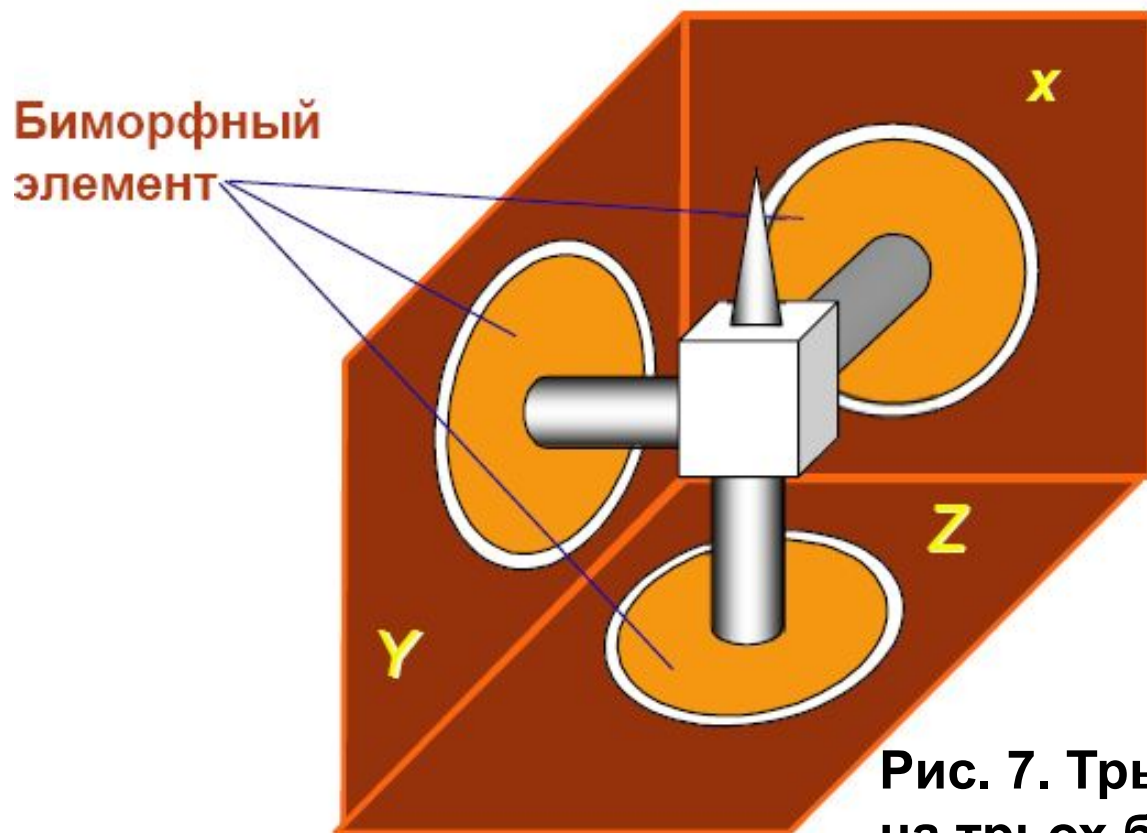


Рис. 7. Трьохкоординатний сканер на трьох біморфних елементах

Якщо зовнішні електроди біморфного елемента розділити на чотири сектори, то можна організувати рух зонда вздовж осі Z і в площині X,Y на одному біморфному елементі.

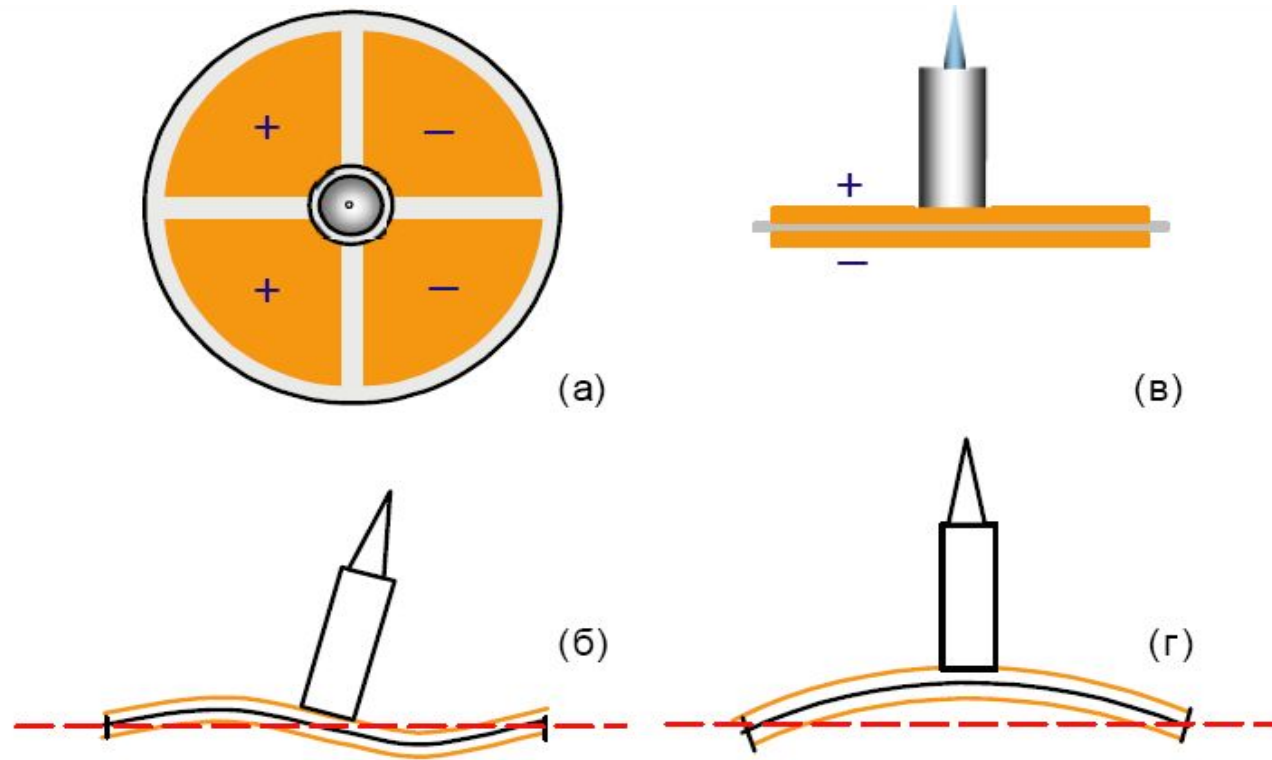


Рис. 8. Схематичне зображення роботи біморфного п'єзосканера

Подаючи протифазні напруги на протилежні пари секцій зовнішніх електродів, можна прогинати біморф так, що зонд буде рухатися в площині X,Y (рис. 8 (а, б)). А змінюючи потенціал внутрішнього електрода відносно всіх секцій зовнішніх електродів, можна прогинати біморф, переміщуючи зонд в напрямку Z (рис. 8 (в, г)).

НЕДОЛІКИ П'ЄЗОКЕРАМІКИ

Нелінійність п'єзокераміки

В загальному випадку, деформація п'єзокераміки є складною функцією зовнішнього електричного поля :

$$u_{ij} = u_{ij}(\vec{E}) .$$

Для малих керуючих полів дана залежність може бути представлена у вигляді:

$$u_{ij} = d_{ijk} E_k + \alpha_{ijkl} E_k E_l + \dots ,$$

де d_{ijk} и α_{ijkl} -лінійні і квадратичні модулі п'єзоелектричного ефекту.

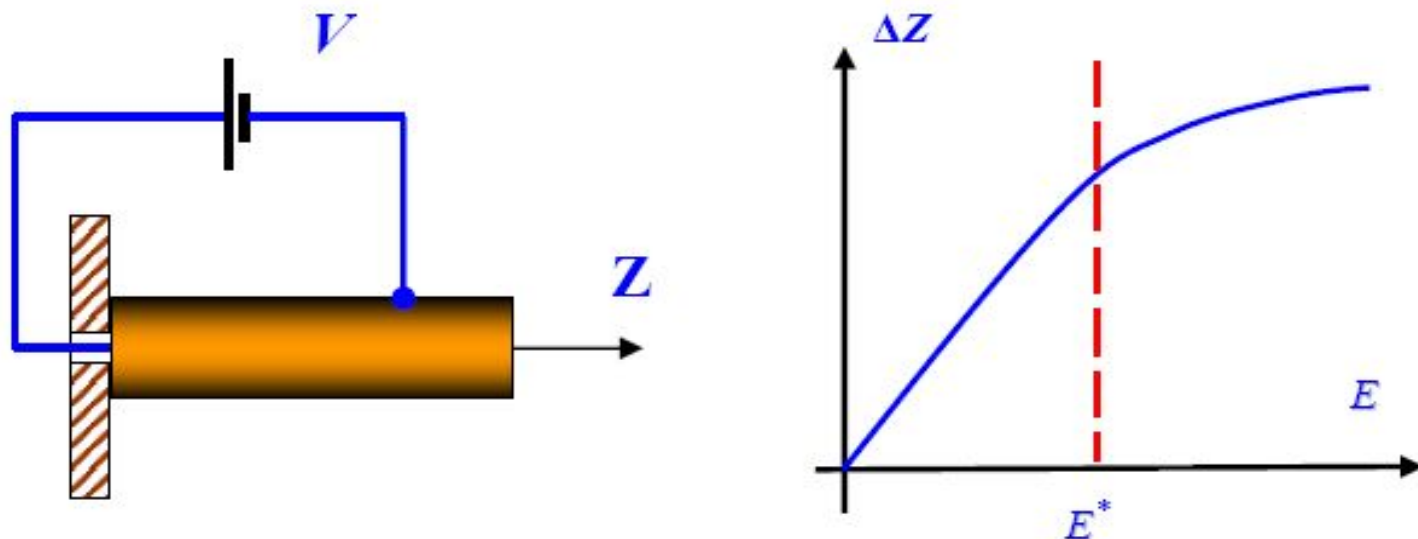


Рис. 9. Схематичне зображення залежності зміщення кераміки від величини прикладеного електричного поля

Типові значення полів E^* , при яких починаються виявлятися нелінійні ефекти, складають порядка 100 В/мм. Тому для коректної роботи скануючих елементів звичайно використовують керуючі поля в області лінійності кераміки ($E < E^*$).

Крип п'єзокераміки

Іншим недоліком п'єзокераміки є так званий крип (*creep* - повзучість) – запізнення реакції на зміну величини керуючого електричного поля. На рис. 10 схематично показано часові діаграми зміни керуючих полів і відповідних зміщень

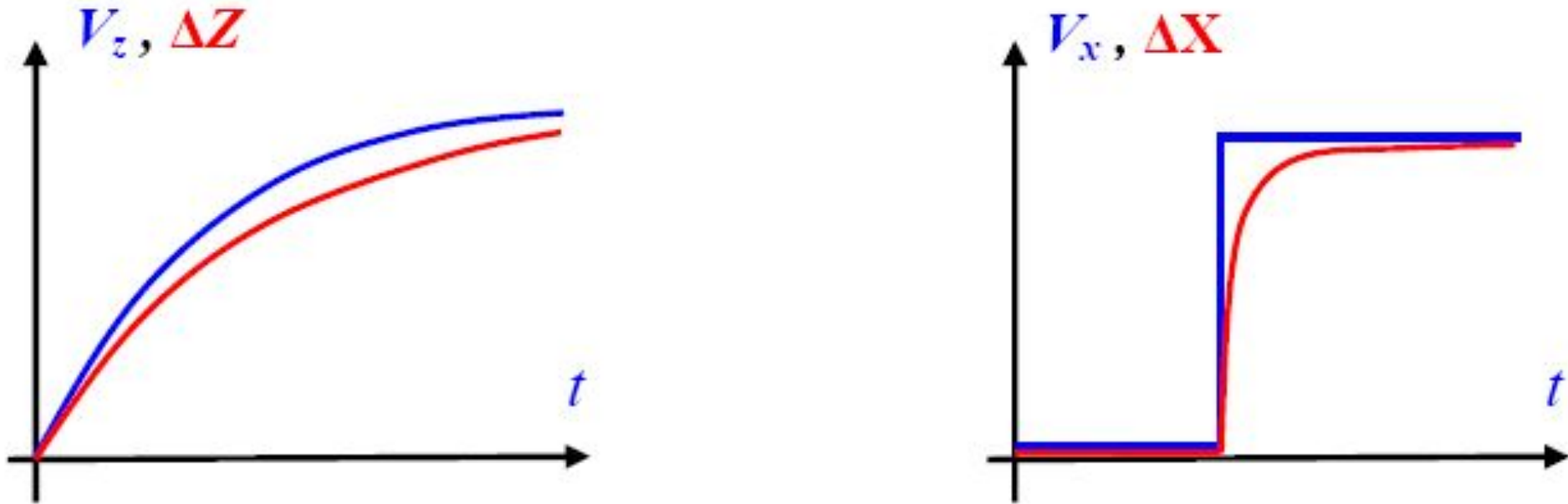


Рис. 10. Схематичні часові діаграми зміни керуючого поля на Z-електроді в колі зворотнього зв'язку і на X-електроді в процесі сканування (показано синім кольором). Червоним кольором схематично показано залежності, що відповідають реакції сканера на зміну керуючої напруги,

Наявність крипу призводить до того, що в СЗМ зображеннях спостерігаються геометричні спотворення. Особливо сильно крип виявляється при виводі сканера в задану точку для проведення локальних вимірів і на початкових етапах процесу сканування. Для зменшення впливу крипу кераміки застосовують часові затримки у вказаних процесах, що дозволяє частково скомпенсувати запізнення сканера.

Гістерезис п'єзокераміки

Ще одним недоліком п'єзокерамік є неоднозначність залежностей видовження від напрямку зміни електричного поля (гістерезис).

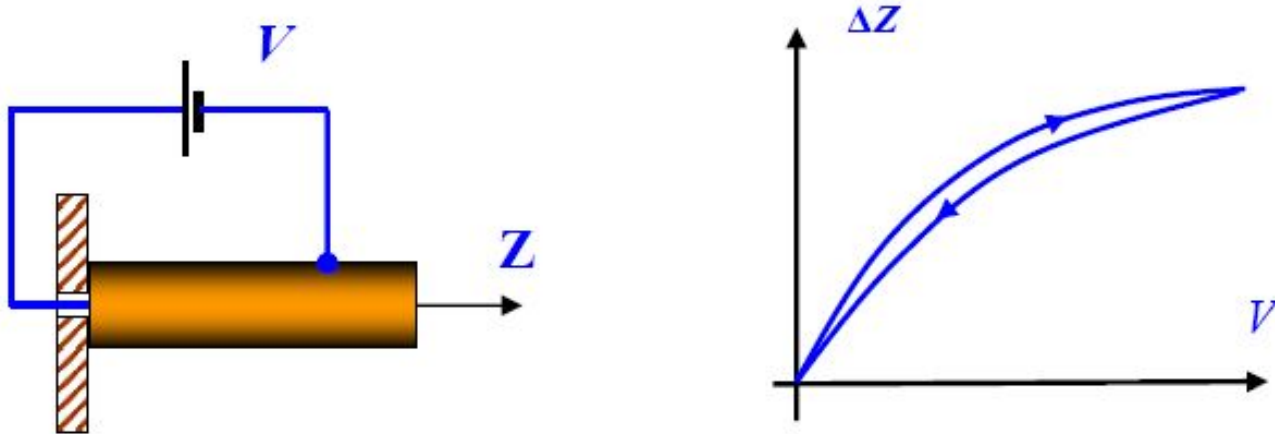


Рис. 11. Залежність величини зміщення п'єзотрубки від величини і напрямку прикладеної напруги

Це призводить до того, що при одних и тих же керуючих напругах п'єзокераміка виявляється в різних точках траєкторії в залежності від напрямку руху (рис. 11). Для виключення спотворень СЗМ зображень, обумовлених гістерезисом п'єзокераміки, реєстрацію інформації при скануванні зразків виконують лише на одній із віток залежності $\Delta Z = f(V)$.

1.3. Пристрої для прицизійних переміщенню зонда и зразка

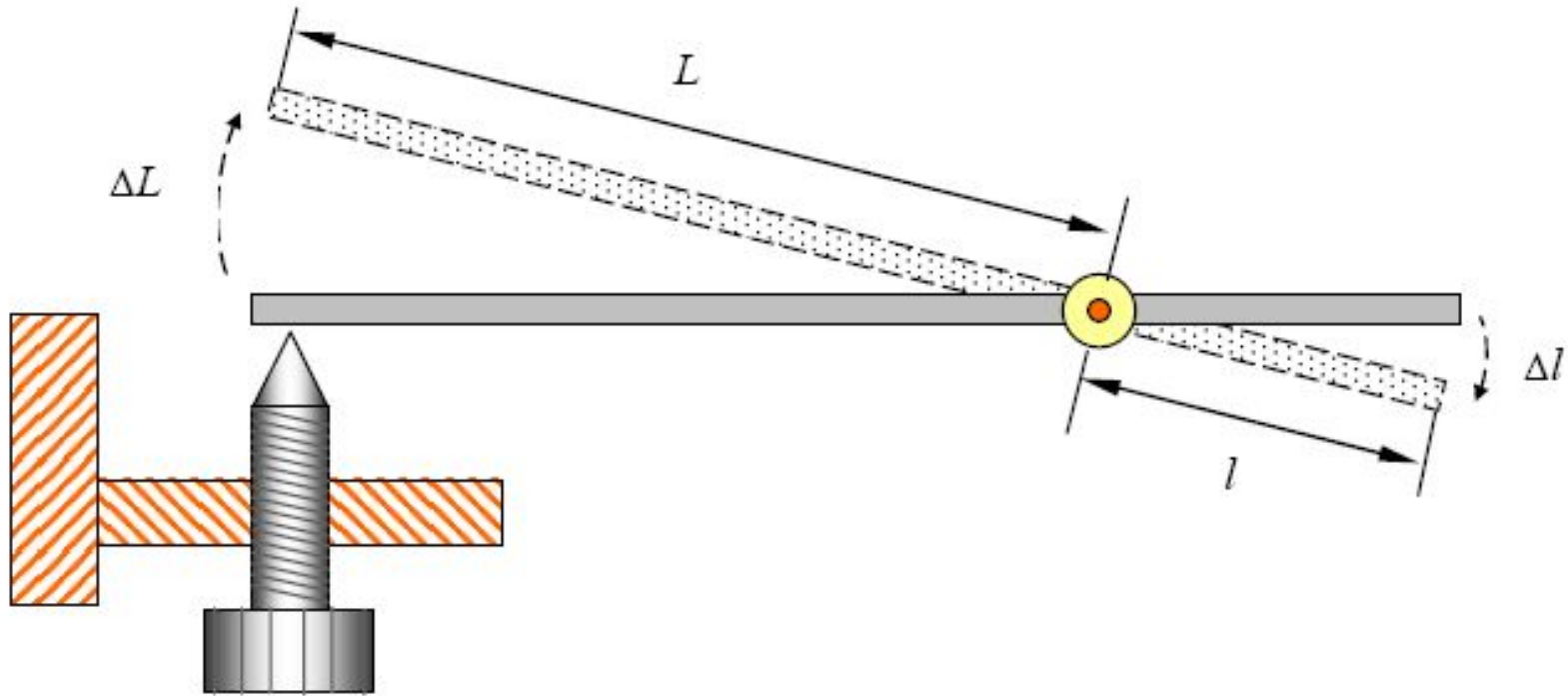


Рис. 12. Схема важільного редуктора переміщень

Механічний важіль дозволяє отримувати редукцію переміщення з коефіцієнтом

$$R = \frac{\Delta L}{\Delta l} = \frac{L}{l} .$$

Пружинний редуктор переміщень

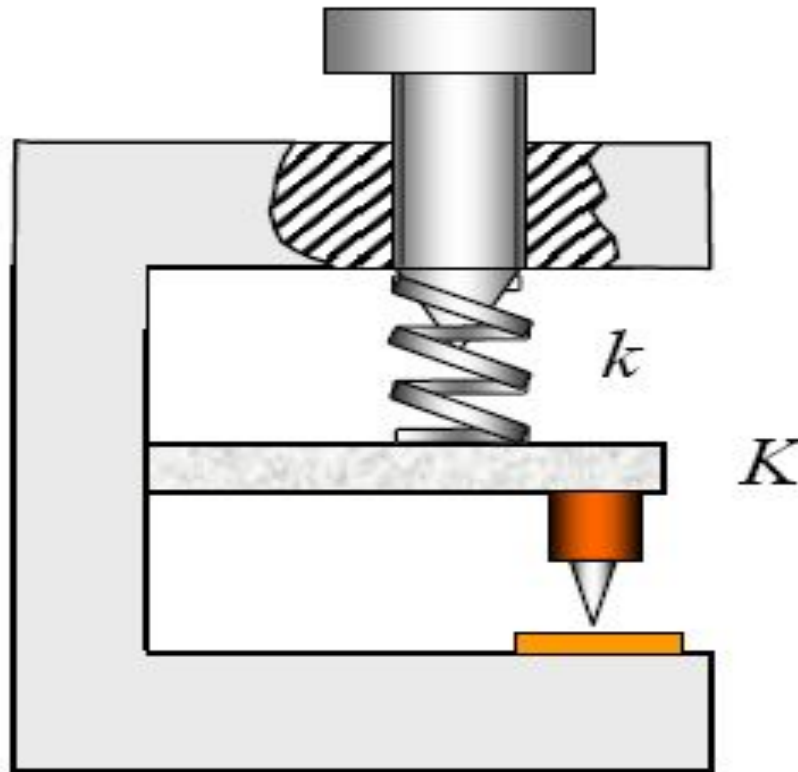


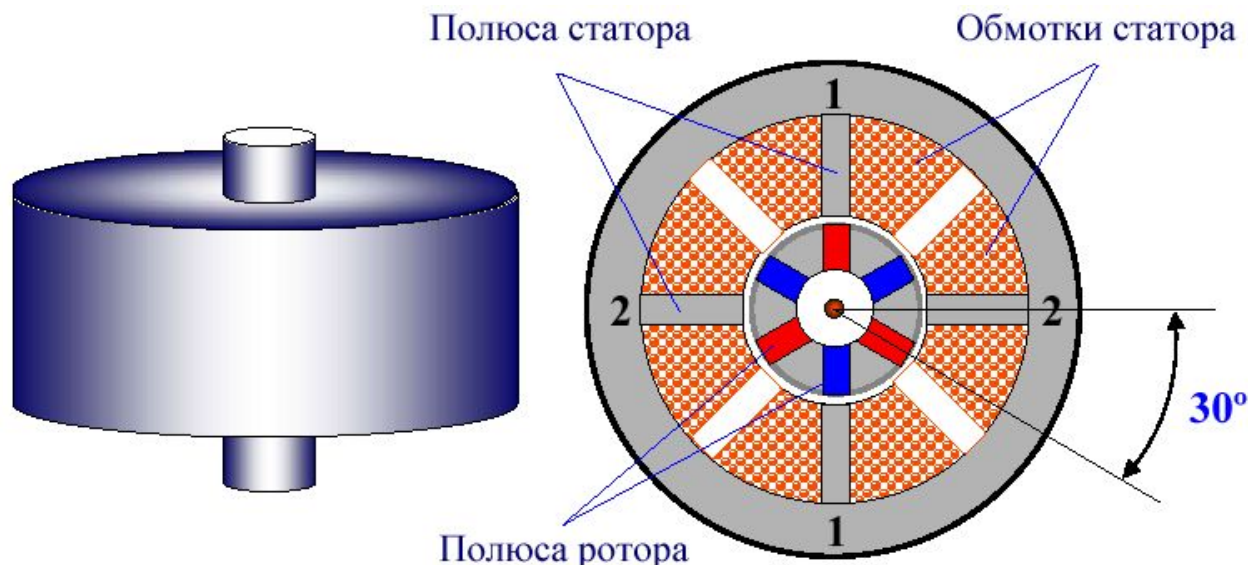
Рис. 13. Схема пружинного редуктора переміщень

Із умови рівноваги випливає, що $F_{np} = k \cdot \Delta l = K \cdot \Delta L$,
де Δl і ΔL - зміщення пружини і пружної балки. В цьому випадку коефіцієнт редукції рівний відношенню коефіцієнтів жорсткості пружних елементів:

$$R = \frac{\Delta l}{\Delta L} = \frac{K}{k}.$$

Крокові електродвигуни

Найбільш просту конструкцію мають двигуни з постійними магнітами. Вони складаються із статора, який має обмотки, і ротора, що містить постійні магніти. На рис. 14 показано спрощену конструкцію крокового електродвигуна. Полюси ротора мають прямолінійну форму і розміщені паралельно осі двигуна. Показаний на рисунку двигун має 3 пари полюсів ротора і 2 пари полюсів статора. Двигун має 2 незалежних обмотки, кожна з яких намотана на два протилежних полюса статора. Показаний на рис. 14 двигун має величину кроку 30 град. При включенні струму в одній із обмоток ротор займає таке положення, при якому різнойменні полюси ротора і статора знаходяться один напроти іншого. Для здійснення неперервного обертання потрібно включати обмотки по чергово.



На практиці застосовуються крокові електродвигуни, що мають більш складну конструкцію. Вони забезпечують від 100 до 400 кроків на один оберт ротора (кут кроку 3.6 – 0.9 град.). Якщо такий двигун працює в парі з різьбовим сполученням, то при кроці різьби порядку 0.1 мм забезпечується точність позиціонування об'єкта порядку 0.25 - 1 мкм. Для збільшення точності застосовуються додаткові механічні редуктори. Можливість електричного керування дозволяє ефективно використовувати КЕД в автоматизованих системах зближення зонда и зразка скануючих зондових мікроскопів.

Рис.14. Кроковий електродвигун з постійними магнітами

Крокові п'єзодвигуни

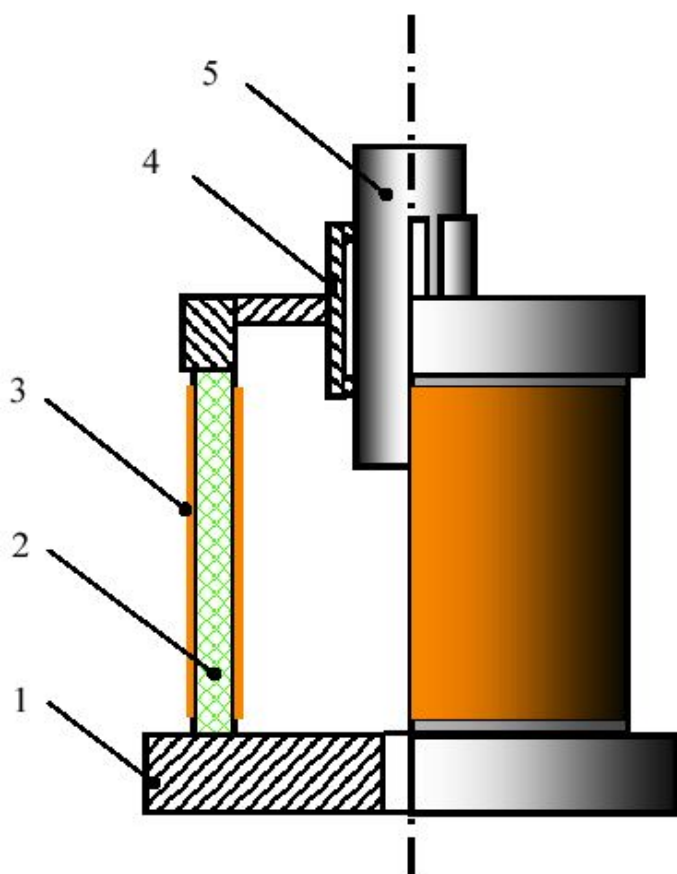


Рис . 15. Кроковий п'єзодвигун

На рисунку 15 позначено :

- 1 – основа ;
- 2 – п'єзоелектрична трубка ;
- 3 – електроди ;
- 4 – розрізана пружина ;
- 5 – циліндричний тримач об'єкта .

Рис . 16. Форма імпульсу керуючої напруги крокового інерційного п'єзодвигуна

U



На пологому фронті пилкоподібної напруги трубка плавно видовжується або зжимається в залежності від полярності напруги, і її кінець разом з пружиною і тримачем об'єкту змещується на відстань

$$\Delta l = d_{31} \frac{l}{h} U .$$

В момент виключення пилкоподібної напруги трубка повертається в початковий стан з прискоренням a , що має на початку максимальну величину:

$$a = \Delta l \omega^2 ,$$

де ω - резонансна частота поздовжніх коливань

трубки. При виконанні умови $F_{mp} < ma$

(m - маса тримача об'єкта , F_{mp} - сила тертя між тримачем об'єкта і розрізаною пружиною) тримач, внаслідок своєї інерційності, проковзує відносно розрізаної пружини.

В результаті тримач об'єкта переміщується на деякий крок $K\Delta l$ відносно вихідного положення.

Коефіцієнт K визначається співвідношенням мас деталей конструкції і жорсткістю розрізаної пружини.

1.4. Захист зондових мікроскопів від зовнішніх впливів

Захист від вібрацій

Любая конструкция сканирующего зондового микроскопа представляет собой колебательную систему, имеющую целый набор собственных резонансных частот ω_k . Внешние механические воздействия на частотах, совпадающих с ω_k , вызывают явления резонанса в конструкции измерительных головок, что приводит к колебаниям зонда относительно образца и воспринимается как паразитный периодический шум, искажающий и размывающий СЗМ изображения поверхности образцов. С целью уменьшения влияния внешних вибраций измерительные головки изготавливают из массивных металлических деталей, имеющих высокие (более 100 кГц) частоты. Поэтому внешние воздействия с частотами $\omega_B \gg \omega_0$ практически не оказывают заметного влияния на колебательную систему.

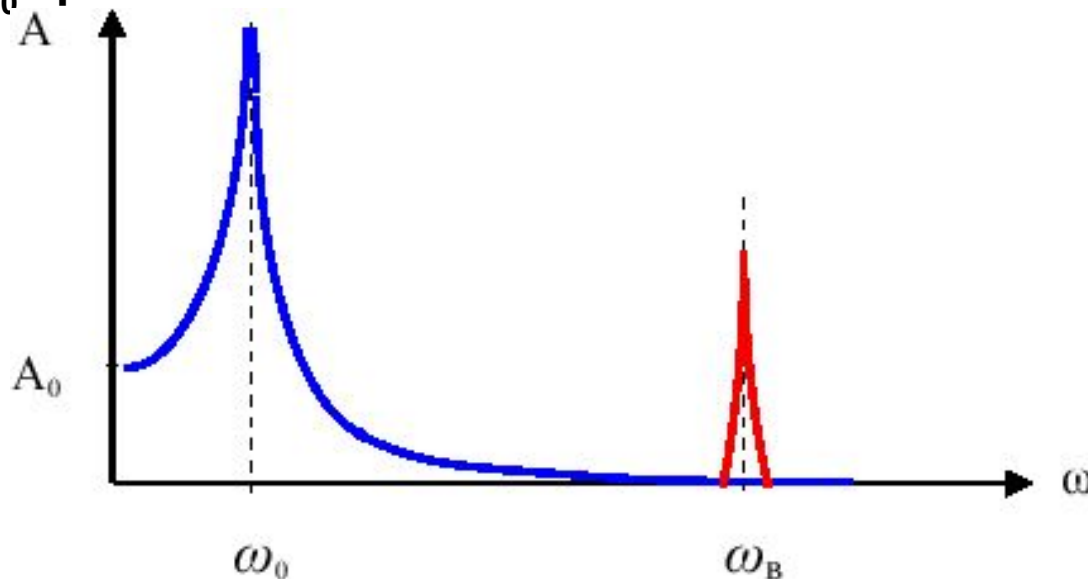


Рис . 17.

Схематическое изображение АЧХ колебательной системы .

Красным цветом показан спектр внешних вибраций.

С целью гашения колебаний на собственных резонансных частотах в виброизолирующие системы вводят диссипативные элементы с вязким трением.

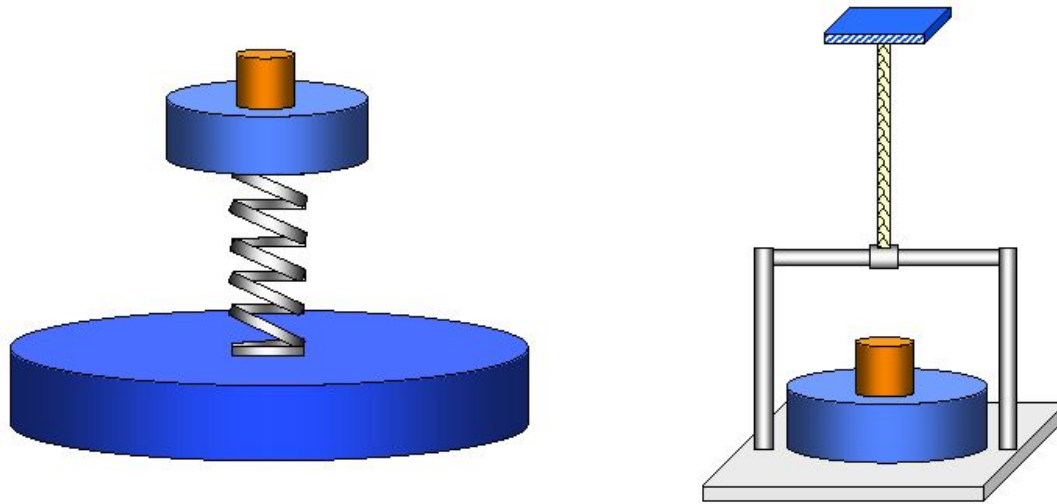


Рис .18. Пассивные виброизолирующие системы

Таким образом, для обеспечения эффективной защиты необходимо, чтобы резонансная частота виброизолирующей системы была как можно меньше. Однако на практике реализовать очень низкие частоты трудно. Для пружинных платформ и упругих подвесов резонансная частота равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где k – жесткость пружины (или упругого подвеса), m - масса виброизолирующей платформы вместе с СЗМ головкой. Оценим параметры виброизолирующей системы, обеспечивающей подавление высокочастотных вибраций. Из условия равновесия следует, что

$$mg = k\Delta l, \quad \text{где } l - \text{удлинение (или сжатие) упругого элемента, } g - \text{ускорение свободного падения. Тогда для величины удлинения получаем:}$$

$$\Delta l = \frac{gm}{k} = \frac{g}{\omega_p^2} = \frac{g}{(2\pi\nu)^2} \cong 0.25 \cdot \frac{m(\Gamma\text{ц})^2}{\nu^2}.$$

таким образом, для получения резонансной частоты виброизолирующей системы порядка 1 Гц необходимо, чтобы удлинение (или сжатие) упругого элемента составляло 25 см. Проще всего такие удлинения можно реализовать с помощью пружинных или резиновых подвесов. Учитывая, что растяжение пружин может достигать 100%, для реализации резонансной частоты подвеса в 1 Гц длина упругого элемента должна составлять также 25 см, а, следовательно, общий размер виброизолирующей системы составит 50 см. Если же немного снизить требования к резонансной частоте, то можно добиться существенного уменьшения размеров виброизолирующей системы. Так, для реализации частоты 10 Гц сжатие упругого элемента должно составлять всего 2,5 мм. Такое сжатие достаточно легко осуществляется на практике с помощью стопки металлических пластин с резиновыми прокладками, что значительно снижает габариты виброизолирующей системы.

Активні системи

Для защиты головок СЗМ успешно применяются также активные системы подавления внешних вибраций . Такие устройства представляют собой электромеханические системы с отрицательной обратной связью , которая обеспечивает стабильное положение виброизолирующей платформы в пространстве (рис . 19).

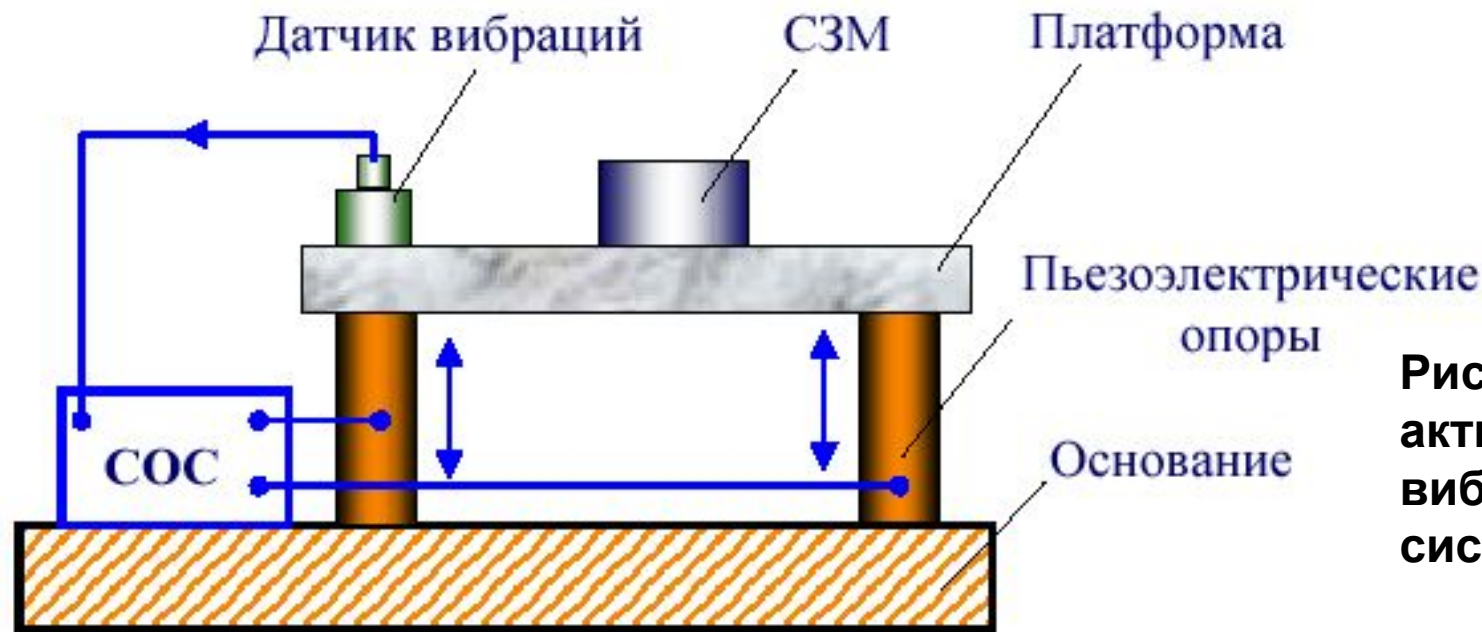


Рис. 19. Схема активной виброизолирующей системы

Принцип работы активных систем можно рассмотреть на следующем простом примере . На платформе располагается датчик вибраций (акселерометр) – устройство, реагирующее на ускорение , испытываемое платформой . Сигнал с датчика поступает в систему обратной связи (СОС), где он усиливается и в противофазе подается на пьезоэлектрические опоры , которые , смещаясь в противоположную сторону , гасят ускорение , испытываемое платформой . Это так называемое пропорциональное регулирование .

Действительно , пусть под действием внешней силы платформа колеблется на частоте ω , так что ее смещение

$$u = u_0 \sin(\omega t).$$

Тогда ускорение , испытываемое платформой , будет равно

$$\ddot{u} = -\omega^2 u_0 \sin(\omega t).$$

Система обратной связи в этом случае подает на опоры противофазный сигнал , в результате чего смещение платформы будет представлять собой суперпозицию двух смещений :

$$u = u_0 \sin(\omega t) - a \sin(\omega t) = (u_0 - a) \sin(\omega t).$$

При этом система обратной связи будет увеличивать амплитуду сигнала a до тех пор , пока не станет равным нулю ускорение платформы :

$$\ddot{u} = -\omega^2 (u_0 - a) \sin(\omega t).$$

Полоса рабочих частот активных систем определяется полосой частот устойчивой работы электромеханической системы обратной связи . В случае негармонических вибраций $u = u(t)$ сигнал с акселерометра два раза интегрируется аппаратными средствами и в противофазе подается на пьезоэлектрические опоры , так что амплитуда колебаний платформы стремится к нулю :

$$u = u(t) - \alpha \iint \ddot{u}(t) dt \Rightarrow 0.$$

На практике применяются многоступенчатые конструкции виброизолирующих систем различного типа , позволяющие существенно повысить степень защиты приборов от внешних вибраций.

Захист від акустичних шумів

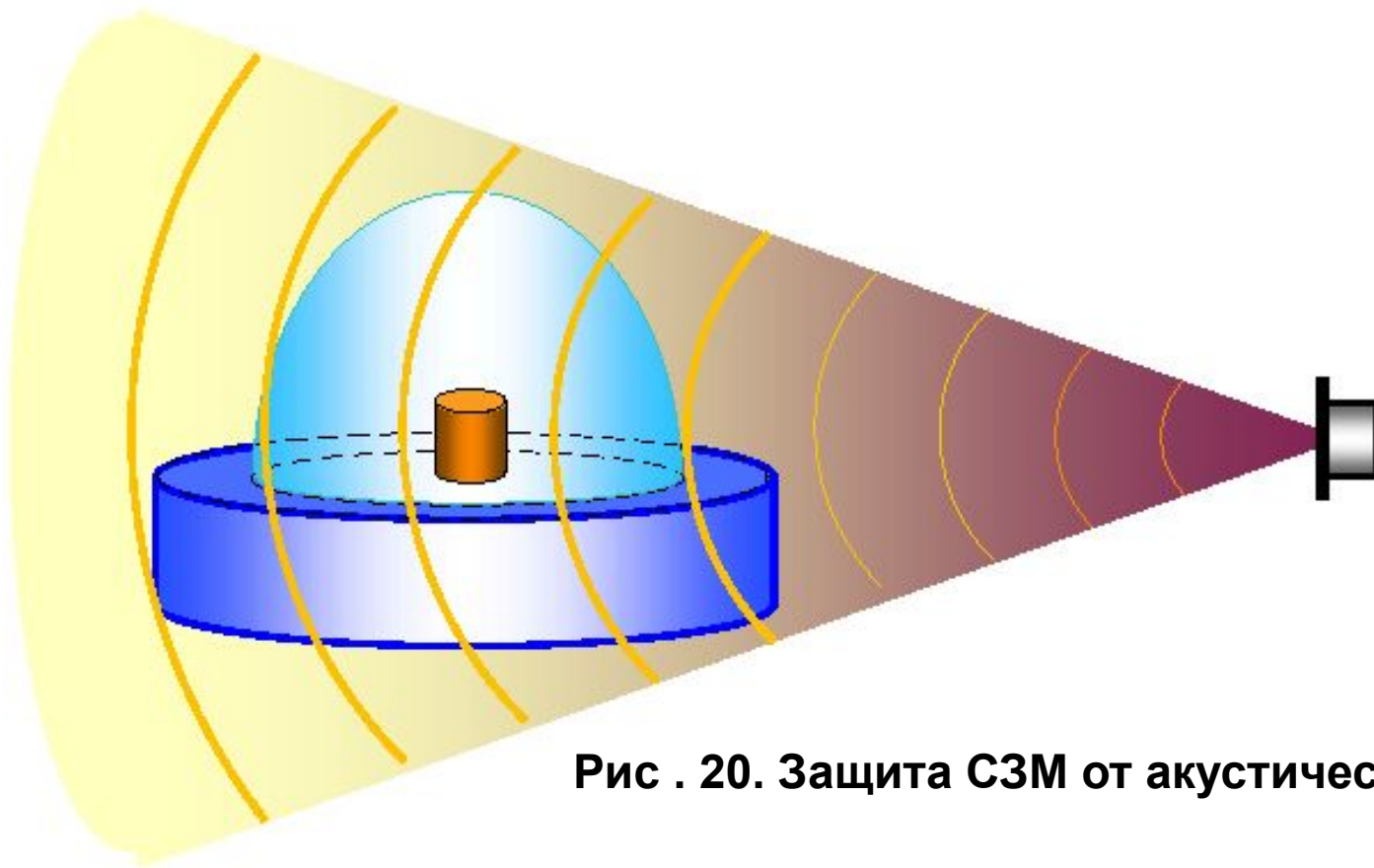


Рис . 20. Защита СЗМ от акустических шумов

Особенностью акустических помех является то , что акустические волны непосредственно воздействуют на элементы конструкции головок СЗМ , что приводит к колебаниям зонда относительно поверхности исследуемого образца . Для защиты СЗМ от акустических помех применяются различные защитные колпаки , позволяющие существенно снизить уровень акустической помехи в области рабочего промежутка микроскопа . Наиболее эффективной защитой от акустических помех является размещение измерительной головки зондового микроскопа в вакуумной камере .

Стабілізація термодрейфа положення зонда над поверхнею

Одной из важных проблем СЗМ является задача стабилизации положения зонда над поверхностью исследуемого образца . Главным источником неустойчивости положения зонда является изменение температуры окружающей среды или разогрев элементов конструкции зондового микроскопа во время его работы . Изменение температуры твердого тела приводит к возникновению термоупругих деформаций :

$$u_{ik} = \alpha_{ik} \Delta T ,$$

где u_{ik} - тензор деформаций , α_{ik} - тензор коэффициентов теплового расширения материала , ΔT - приращение температуры .

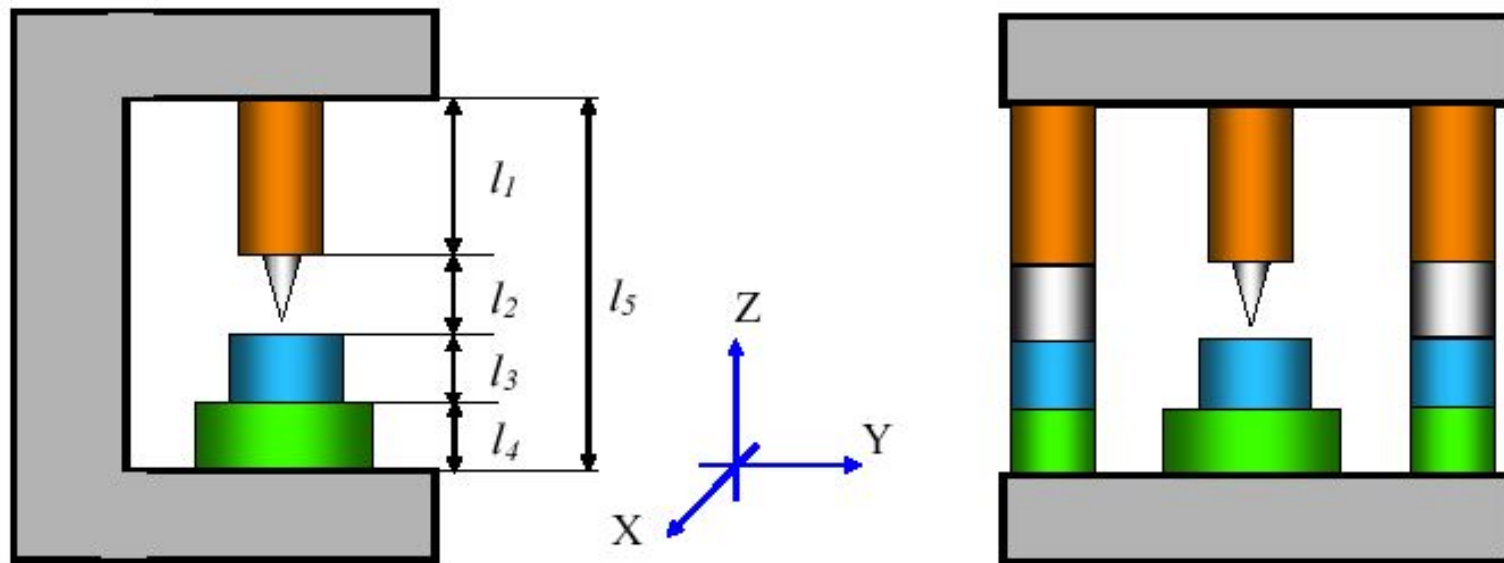
Абсолютное удлинение элементов конструкции микроскопа может быть оценено исходя из следующих соотношений :

$$u = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T ;$$

Идея термокомпенсации заключается в следующем . Любую конструкцию СЗМ можно представить в виде набора элементов с различными коэффициентами теплового расширения (рис . 21 (а)).

$$\Delta l = l_0 \alpha \cdot \Delta T .$$

Идея термокомпенсации заключается в следующем .
 Любую конструкцию СЗМ можно представить в виде набора элементов с различными коэффициентами теплового расширения (рис . 21 (а)).



(а) **Рис . 21. Компенсация тепловых расширений конструкции СЗМ**

(б)

Для компенсации термодрейфа в конструкцию измерительных головок СЗМ вводят компенсирующие элементы, имеющие различные коэффициенты расширения так, чтобы выполнялось условие равенства нулю суммы температурных расширений в различных плечах конструкции:

$$\Delta L = \sum_i \Delta l_i = \Delta T \sum_i \alpha_i l_i \Rightarrow 0 .$$

Наиболее простым способом уменьшения термодрейфа положения зонда по оси Z является введение в конструкцию СЗМ компенсирующих элементов из того же материала и с теми же характерными размерами , что и основные элементы конструкции (рис . 21 (б)). При изменении температуры такой конструкции смещение зонда в направлении Z будет минимальным . Для стабилизации положения зонда в плоскости X,Y измерительные головки микроскопов изготавливаются в виде аксиально-симметричных конструкций .

1.5. Формування і обробка СЗМ зображень

Процесс сканирования поверхности в сканирующем зондовом микроскопе имеет сходство с движением электронного луча по экрану в электроннолучевой трубке телевизора . Зонд движется вдоль линии (строки) сначала в прямом , а потом в обратном направлении (строчная развертка), затем переходит на следующую строку (кадровая развертка). Движение зонда осуществляется с помощью сканера небольшими шагами под действием пилообразных напряжений , формируемых цифро – аналоговыми преобразователями . Регистрация информации о рельефе поверхности производится , как правило , на прямом проходе .

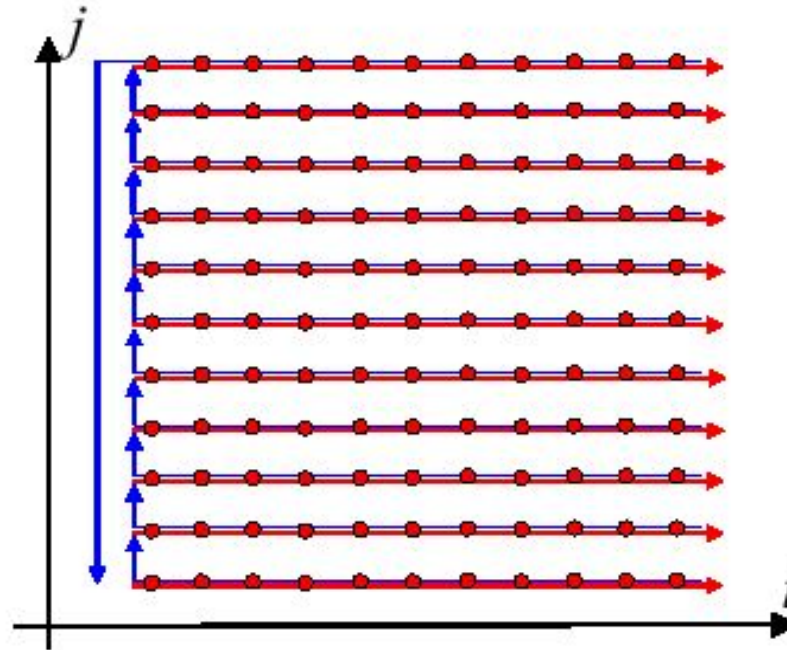


Рис . 23. Схематическое изображение процесса сканирования .
Направление прямого хода сканера обозначено стрелками красного цвета ,
Обратный ход сканера обозначен стрелками синего цвета .
Регистрация информации производится в точках на прямом проходе

Информация, полученная с помощью сканирующего зондового микроскопа, хранится в виде СЗМ кадра - двумерного массива целых чисел a_{ij} (матрицы). Физический смысл данных чисел определяется той величиной, которая оцифровывалась в процессе сканирования. Каждому значению пары индексов ij соответствует определенная точка поверхности в пределах поля сканирования.

Координаты точек поверхности вычисляются с помощью простого умножения соответствующего индекса на величину расстояния между точками, в которых производилась запись информации: $x_i = x_0 \cdot i$, $y_j = y_0 \cdot j$. Здесь x_0 и y_0 – расстояния между соседними точками вдоль оси X и Y, в которых производилась запись информации. Как правило, СЗМ кадры представляют собой квадратные матрицы, имеющие размер 2^n (в основном 256×256 и 512×512 элементов). Визуализация СЗМ кадров производится средствами компьютерной графики, в основном, в виде трехмерных (3D) и двумерных яркостных (2D) изображений.

При 3D визуализации изображение поверхности $Z = f(x, y)$, соответствующей СЗМ данным, строится в аксонометрической перспективе с помощью пикселей или линий. В дополнение к этому используются различные способы подсвечивания соответствующих различной высоте рельефа поверхности.

Наиболее эффективным способом раскраски 3D изображений является моделирование условий подсветки поверхности точечным источником, расположенным в некоторой точке пространства над поверхностью (рис. 24).

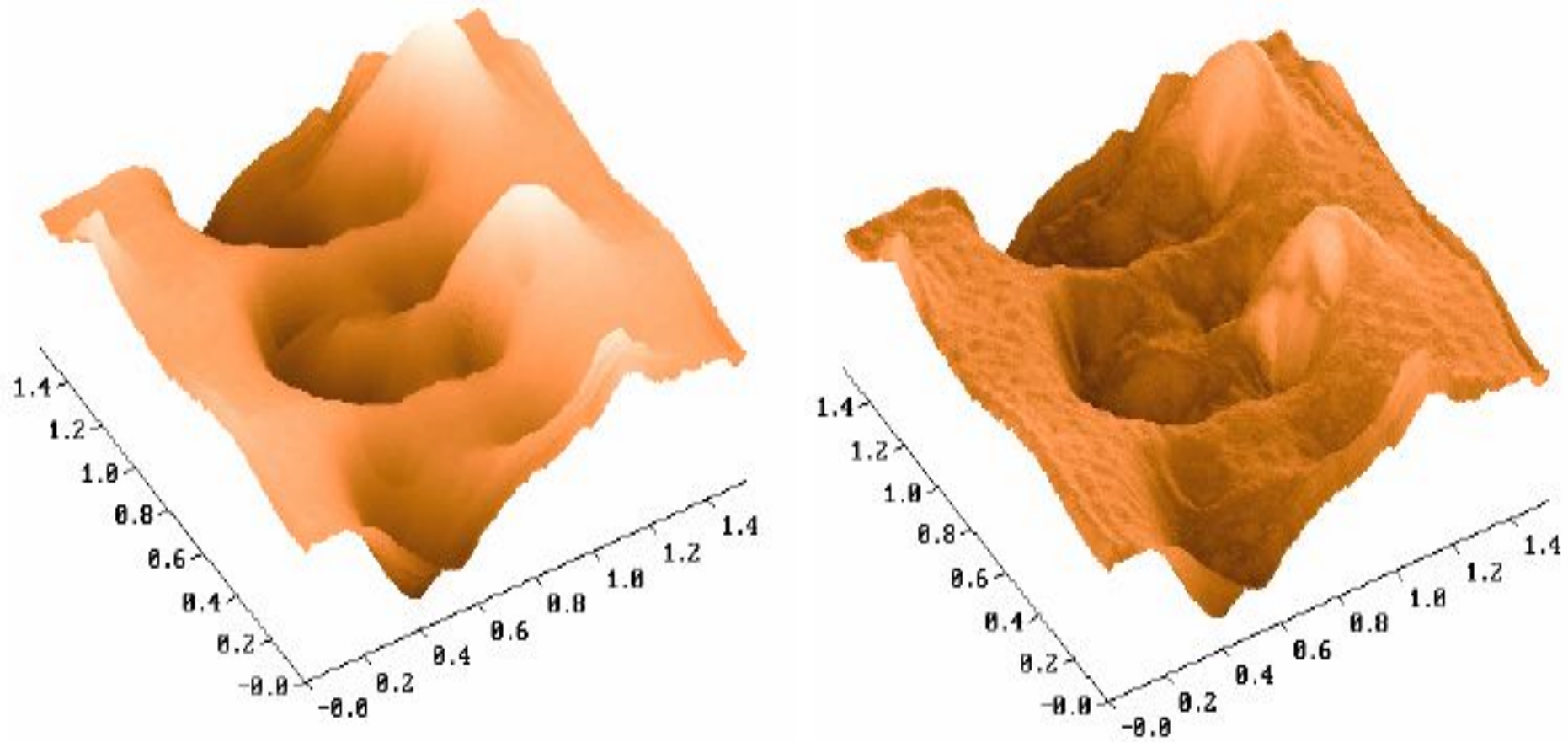


Рис. 24. 3D визуализация рельефа поверхности с подсветкой по высоте (а) и с боковой подсветкой (б)

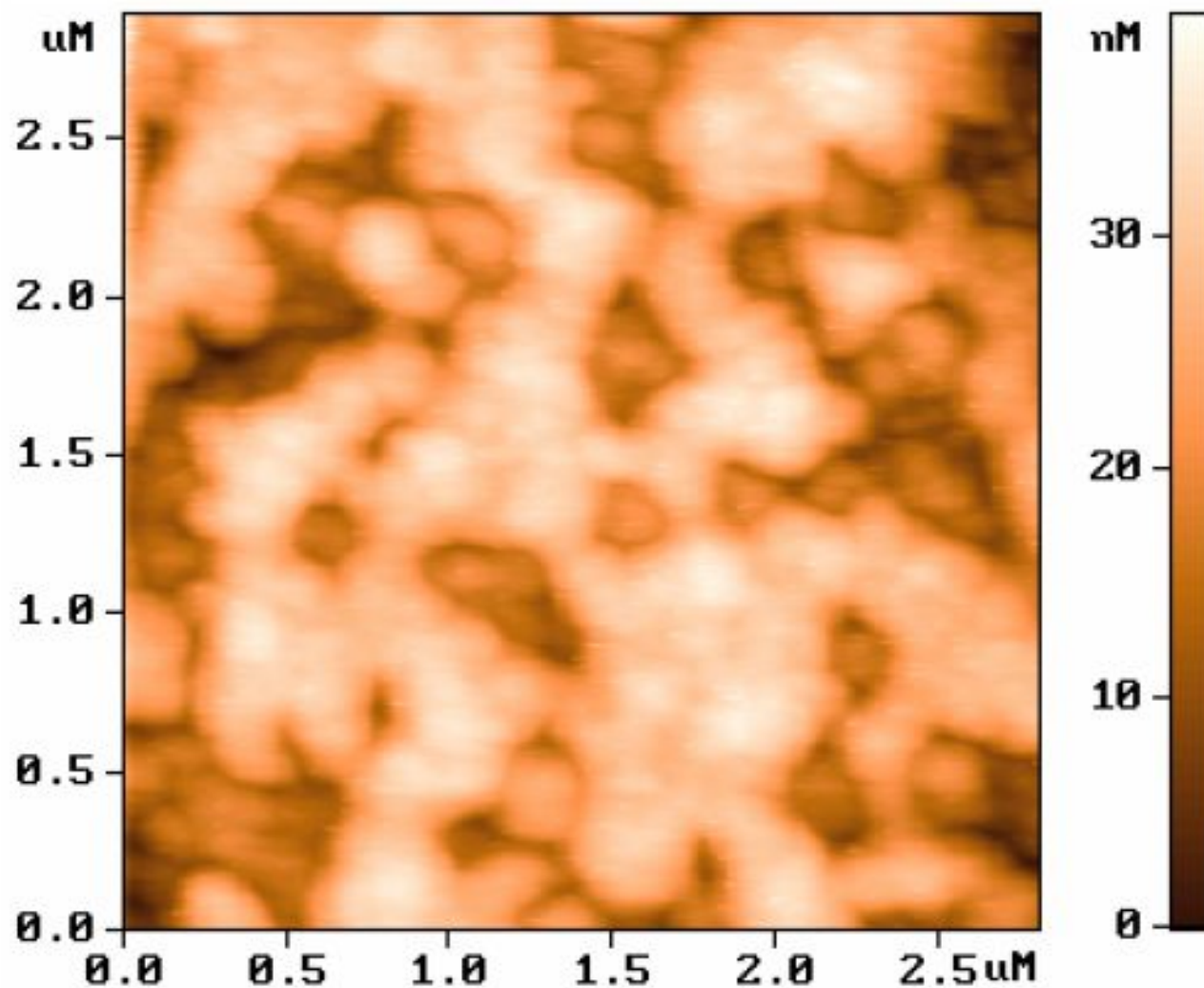


Рис. 25. Яркое 2D изображение поверхности

СЗМ изображения, наряду с полезной информацией, содержат также много побочной информации, искажающей данные о морфологии и свойствах поверхности. На рис. 26 схематически представлены возможные искажения в СЗМ изображениях поверхности, обусловленные неидеальностью аппаратуры и внешними паразитными воздействиями.

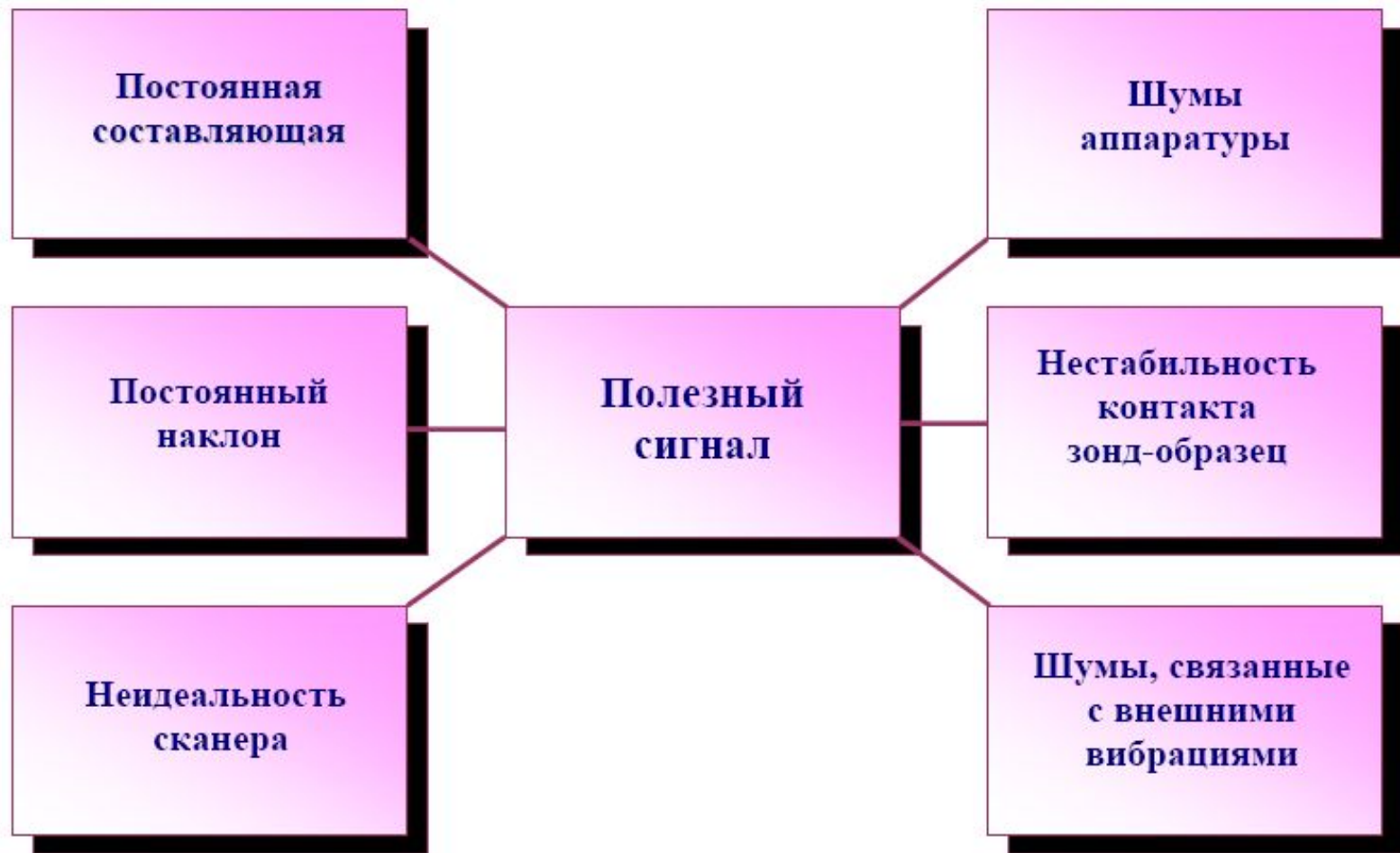


Рис. 26. Возможные искажения в СЗМ изображениях

Віднімання постійної складової

СЗМ изображения, как правило, содержат постоянную составляющую, которая не несет полезной информации о рельефе поверхности, а отражает точность подвода образца в середину динамического диапазона перемещений сканера по оси Z .

Постоянная составляющая удаляется из СЗМ кадра программным способом, так что новые значения высот рельефа в кадре равны

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - Z^*, \text{ где } Z^* = (1 / N^2) \sum_{ij} Z_{ij}$$

Віднімання постійного нахилу

Изображения поверхности, получаемые с помощью зондовых микроскопов, как правило, имеют общий наклон. Это может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, наклон может появляться вследствие неточной установки образца относительно зонда; во-вторых, он может быть связан с температурным дрейфом, который приводит к смещению зонда относительно образца; в-третьих, он может быть обусловлен нелинейностью перемещений пьезосканера.

Для устранения данного недостатка производят операцию вычитания постоянного наклона. Для этого на первом этапе методом наименьших квадратов находится аппроксимирующая плоскость $P(x,y)$, имеющая минимальные отклонения от рельефа поверхности $Z = f(x,y)$ (рис. 27). Затем производится вычитание данной плоскости из СЗМ изображения. Если наклон в СЗМ изображении обусловлен наклоном образца относительно оси зонда, то целесообразно произвести поворот плоскости на угол, соответствующий углу между нормалью к плоскости $\vec{n}$ и осью Z ; при этом координаты поверхности $Z = f(x,y)$ преобразуются в соответствии с преобразованиями пространственного поворота.

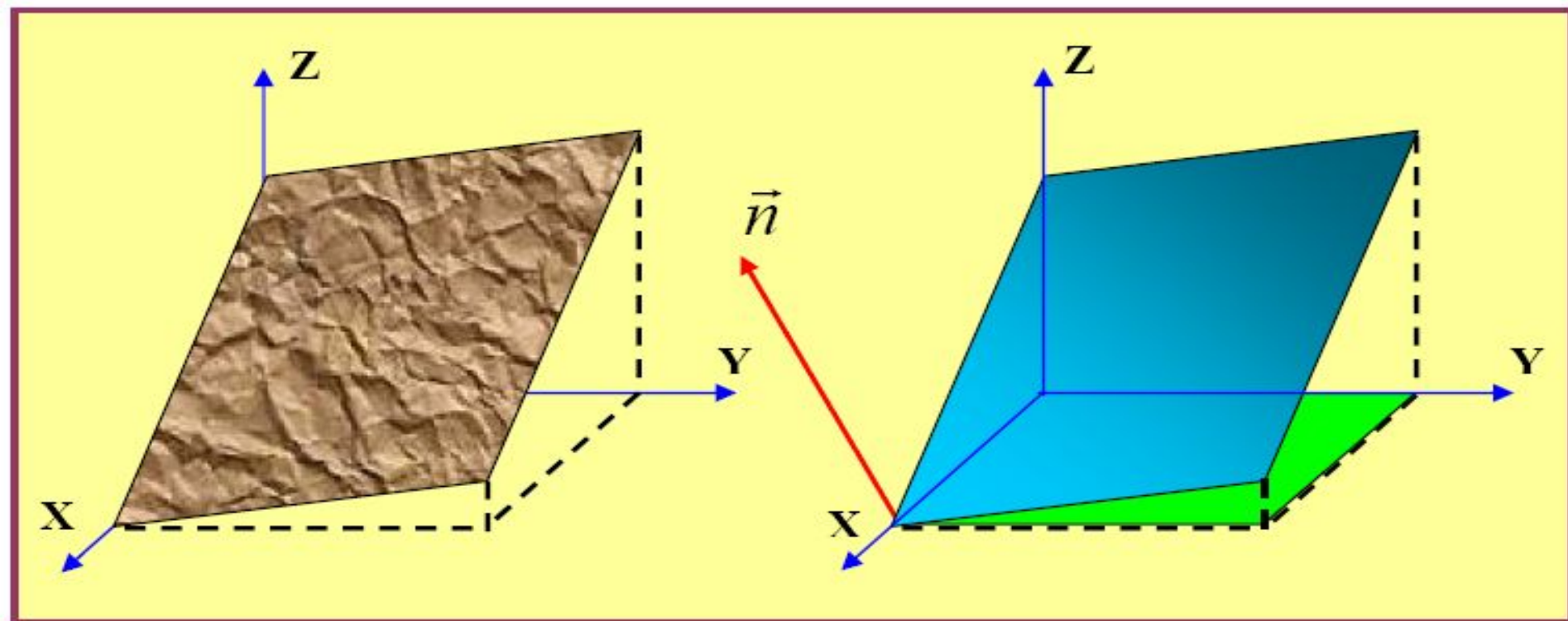


Рис. 27. Вычитание постоянного наклона из СЗМ изображения поверхности

Если наклон обусловлен термодрейфом, то процедура вычитания наклона сводится к вычитанию Z – координат плоскости из Z - координат СЗМ изображения:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - P_{ij}^{(1)}.$$

Это позволяет сохранить правильные геометрические соотношения в плоскости X, Y между объектами в СЗМ изображении. На рис. 28 представлен результат вычитания плоскости из реального АСМ изображения поверхности.

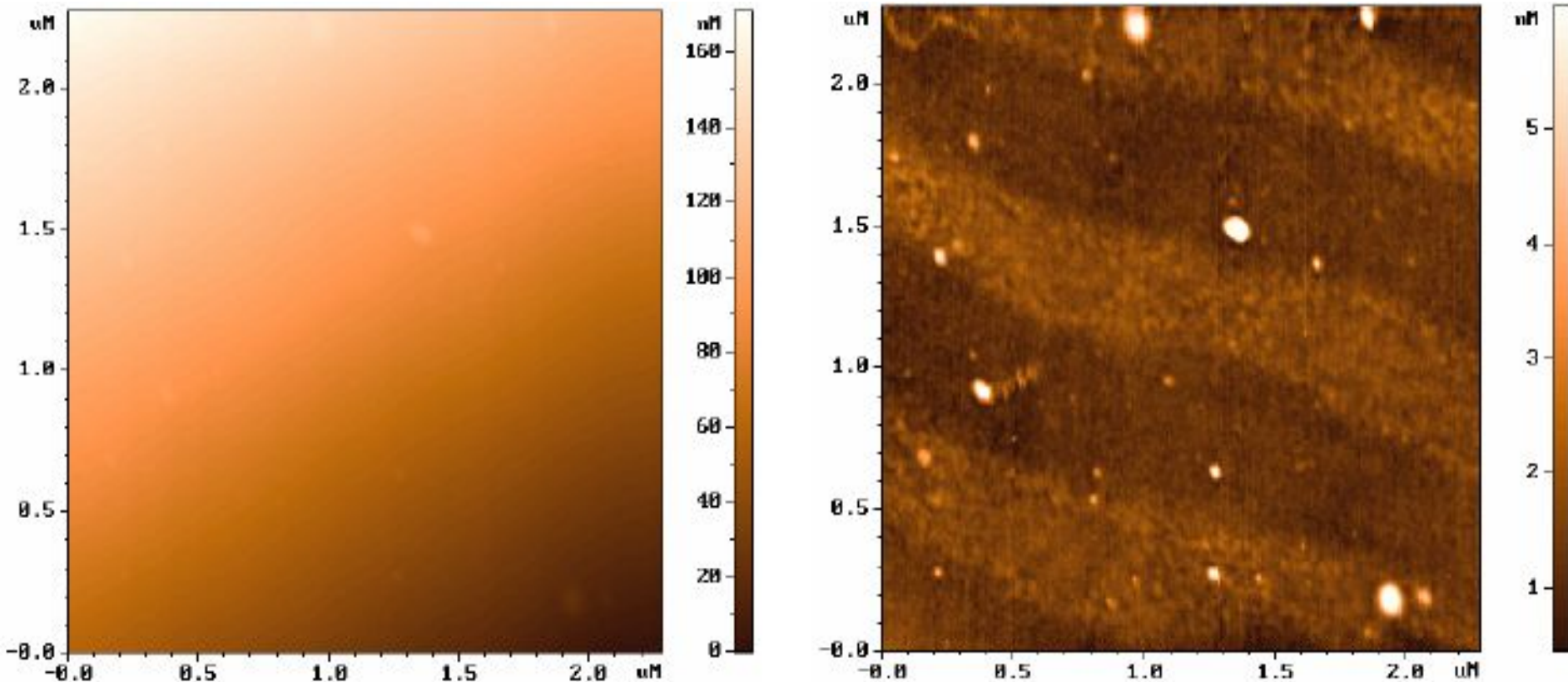


Рис. 28. Вычитание наклонной плоскости из АСМ изображения поверхности

Ліквідація спотворень, пов'язаних з неідеальністю сканера

Неідеальність свойств пьезосканера приводит к тому, что СЗМ изображение содержит ряд специфических искажений. Частично неидеальности сканера, такие как неравноправность прямого и обратного хода сканера (гистерезис), крип и нелинейность пьезокерамики компенсируются аппаратными средствами и выбором оптимальных режимов сканирования. Однако, СЗМ изображения могут содержать искажения, которые трудно устранить на аппаратном уровне. В частности, поскольку движение сканера в плоскости образца влияет на положение зонда над поверхностью (по оси Z), СЗМ изображения представляют собой суперпозицию реального рельефа и некоторой поверхности второго (а часто и более высокого) порядка (рис. 29).

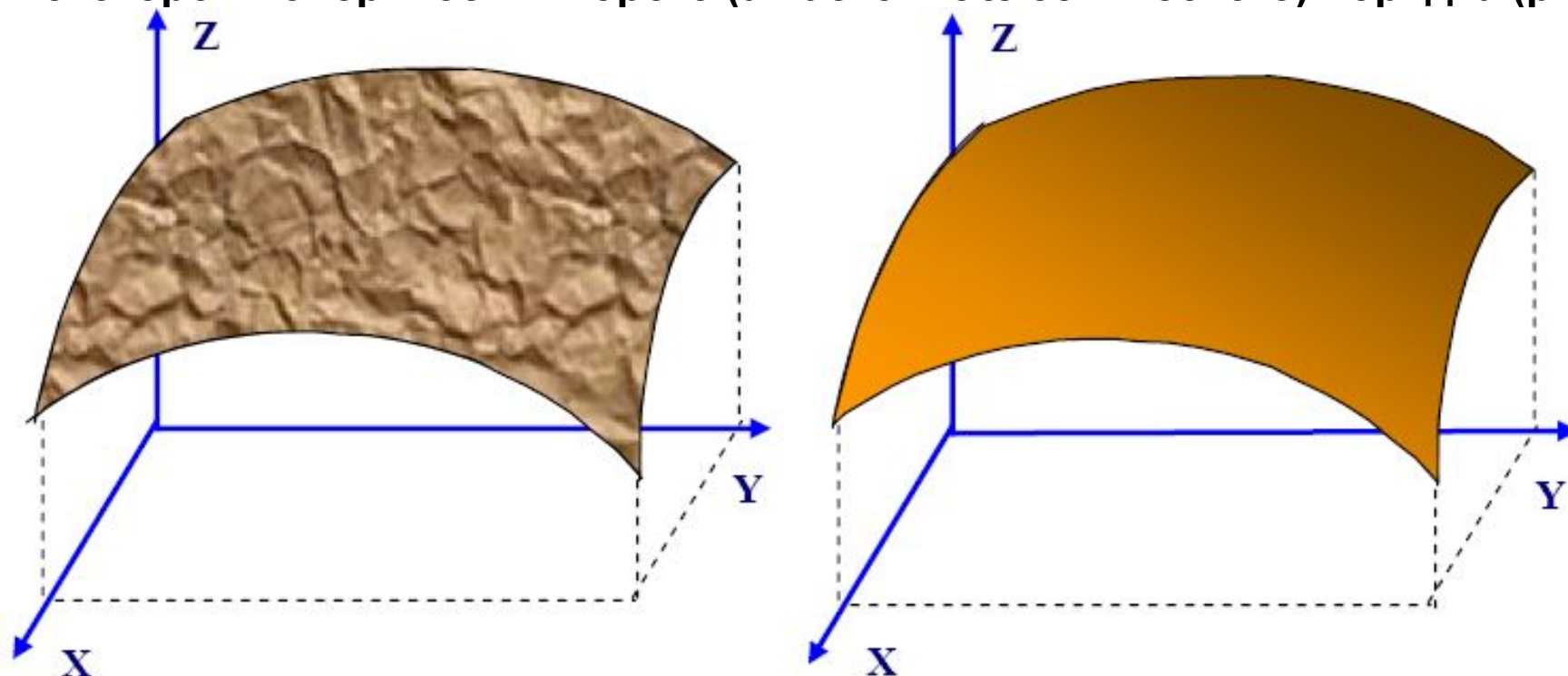


Рис. 29. Вычитание поверхности второго порядка из СЗМ изображения поверхности

Для устранения искажений такого рода методом наименьших квадратов находится аппроксимирующая поверхность второго порядка $P(2)(x,y)$, имеющая минимальные отклонения от исходной функции $Z = f(x,y)$, и затем данная поверхность вычитается из исходного СЗМ изображения:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - P_{ij}^{(2)}.$$

На рис. 30 представлен результат вычитания поверхности второго порядка из реального АСМ изображения поверхности.

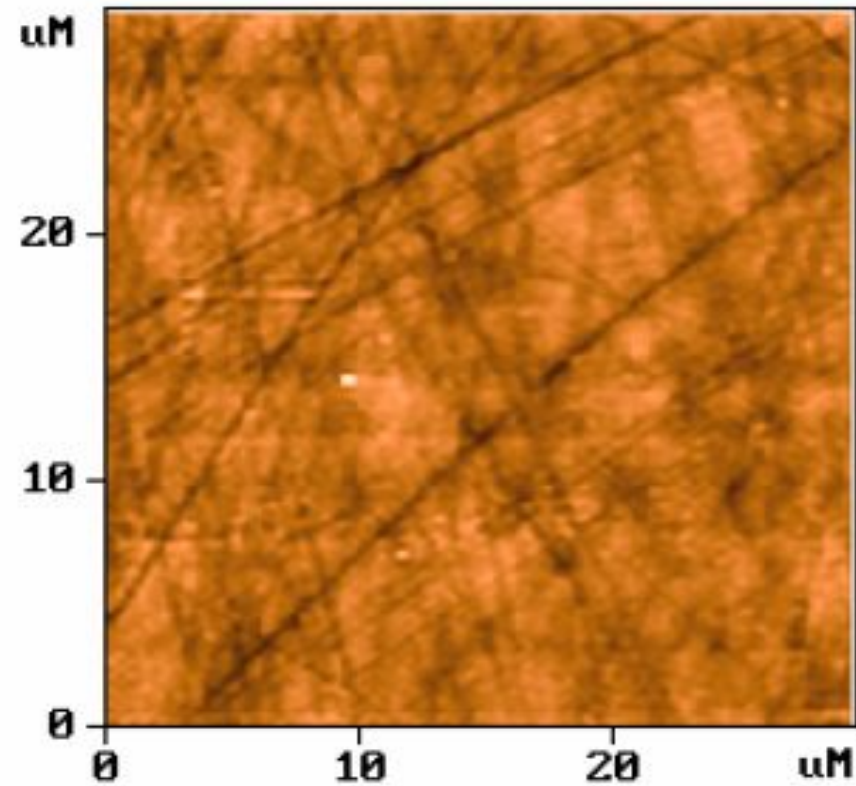
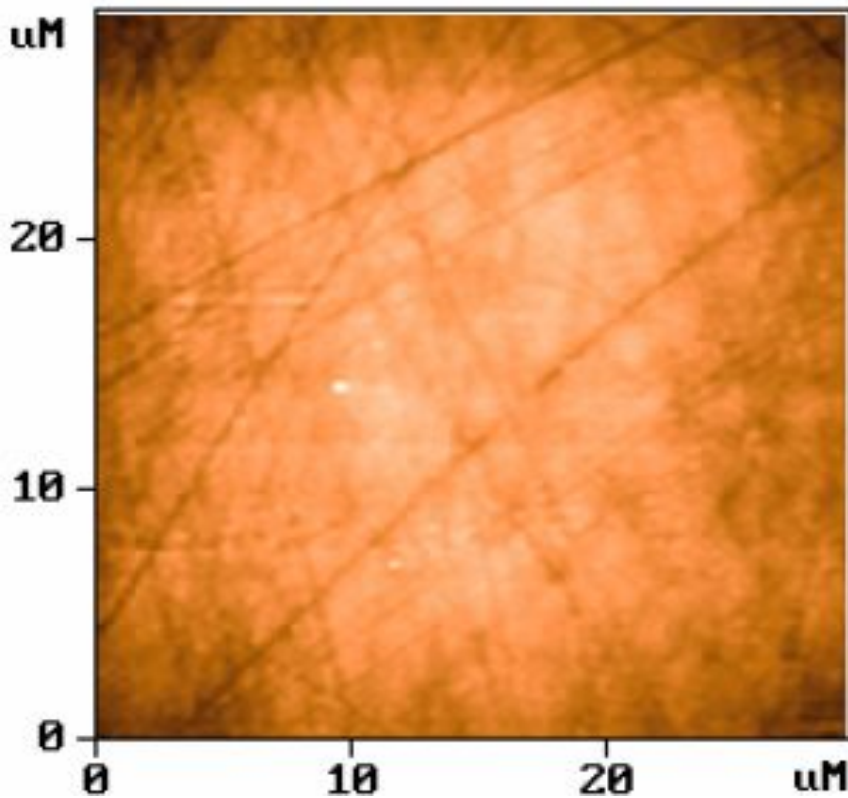
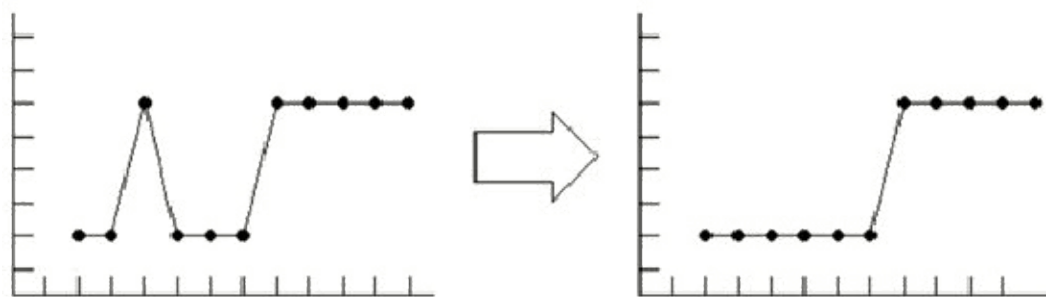


Рис. 30. Вычитание поверхности 2-го порядка из АСМ изображения поверхности

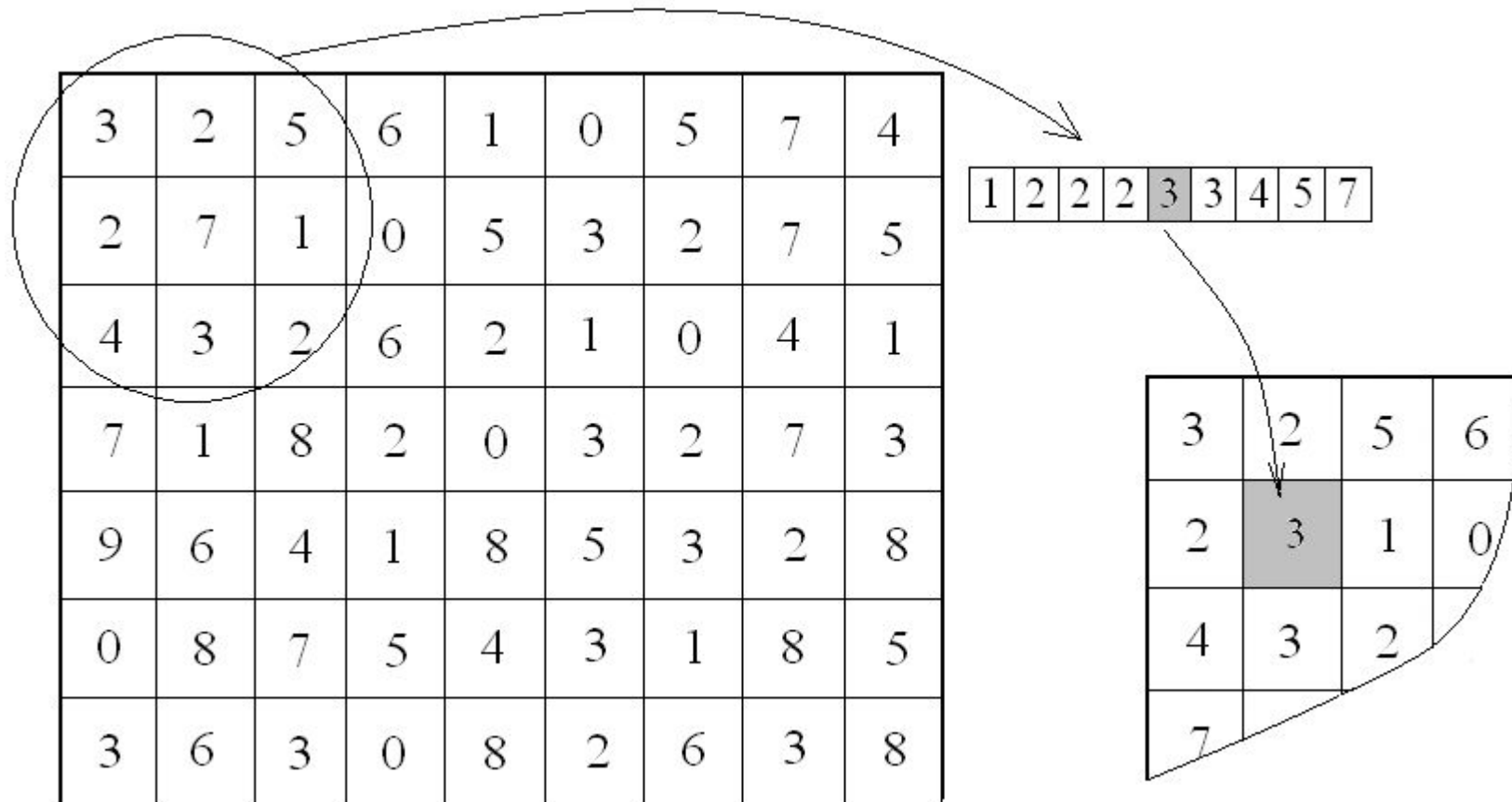
Фільтрація СЗМ зображень

Шумы аппаратуры (в основном, это шумы высокочувствительных входных усилителей), нестабильности контакта зонд-образец при сканировании, внешние акустические шумы и вибрации приводят к тому, что СЗМ изображения, наряду с полезной информацией, имеют шумовую составляющую. Частично шумы СЗМ изображений могут быть удалены программными средствами.

СХЕМА МЕДІАННОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ



ПРИКЛАД МЕДІАННОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ



Медіанна фільтрація. Хорошие результаты при удалении высокочастотных случайных помех в СЗМ кадрах дает медианная фильтрация. Это нелинейный метод обработки изображений, суть которого можно пояснить следующим образом. Выбирается рабочее окно фильтра, состоящее из $n \times n$ точек (для определенности возьмем окно 3×3 , т.е. содержащее 9 точек (рис. 31)).

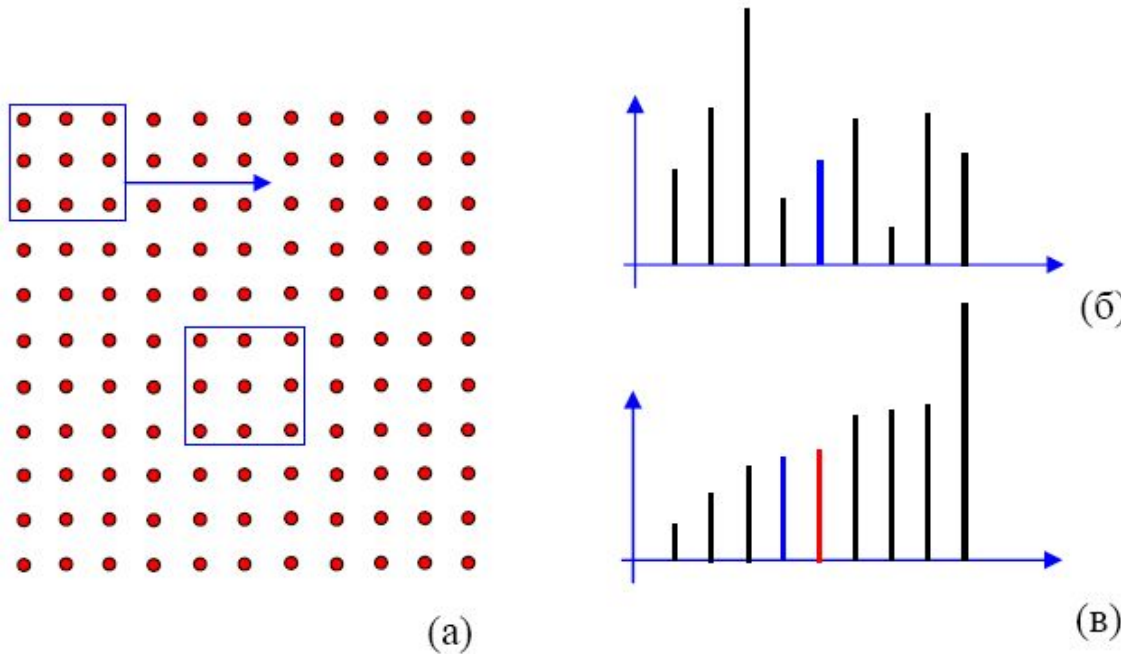


Рис. 31. Принцип работы медианного фильтра с окном 3×3 .
(а) – смещение окна в процессе фильтрации массива;
(б) – расположение элементов в неотсортированном массиве (синим цветом помечен центральный элемент);
(в) – расположение элементов в отсортированном массиве (новый центральный элемент помечен красным цветом)

В процессе фильтрации это окно перемещается по кадру от точки к точке, и производится следующая процедура. Значения амплитуды СЗМ изображения в точках данного окна выстраиваются по возрастанию, и значение, стоящее в центре отсортированного ряда, заносится в центральную точку окна. Затем окно сдвигается в следующую точку, и процедура сортировки повторяется. Таким образом, мощные случайные выбросы и провалы при такой сортировке всегда оказываются на краю сортируемого массива и не войдут в итоговое (отфильтрованное) изображение. Заметим, что при такой обработке по краям кадра остаются нефильтрованные области, которые отбрасываются в конечном изображении.

На рис. 32 представлен результат медианной фильтрации реального АСМ изображения поверхности

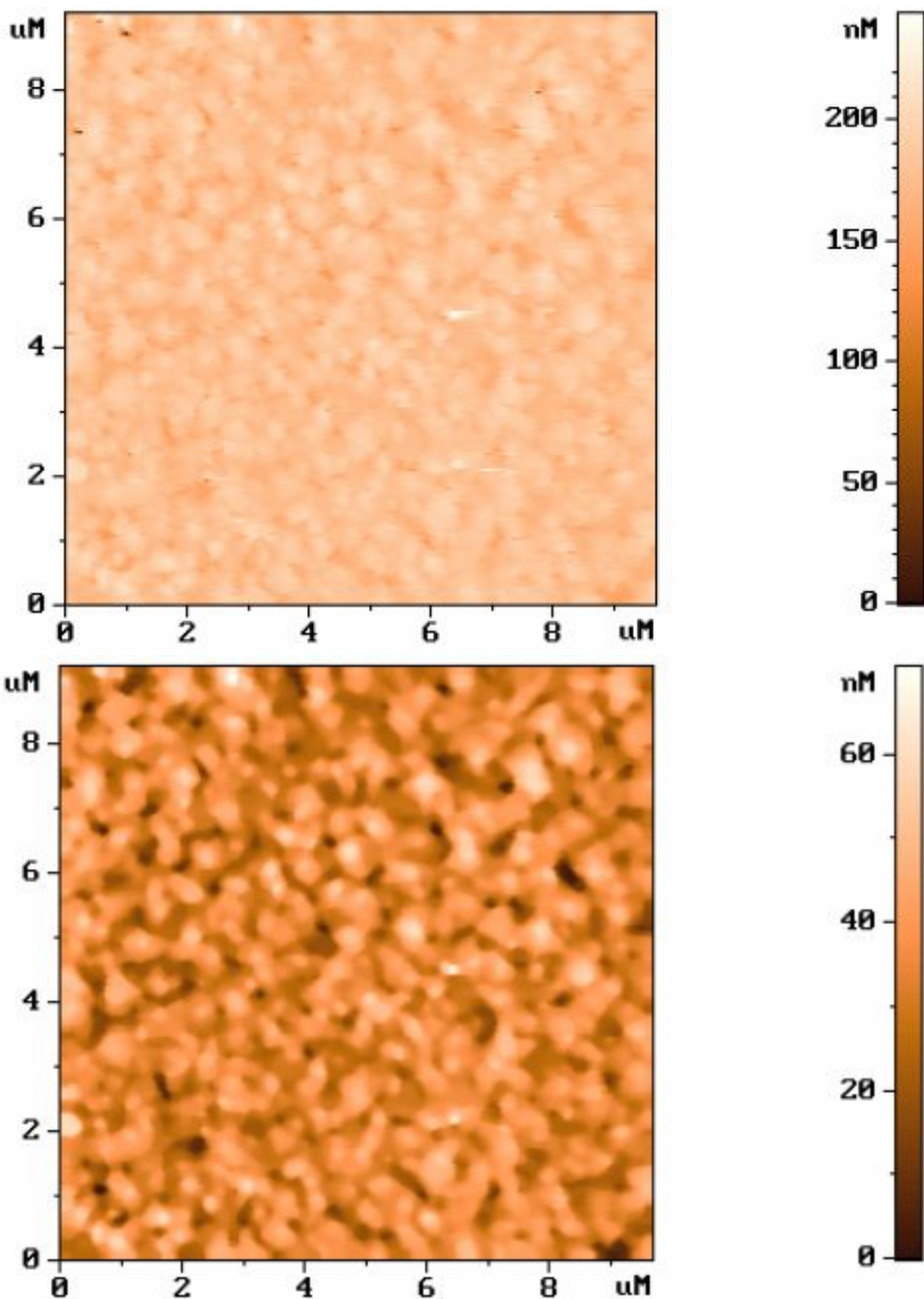


Рис. 32. Результаты медианной фильтрации с окном 5×5 АСМ изображения поверхности

Усреднения по рядках

Процесс сканирования поверхности в сканирующем зондовом микроскопе происходит таким образом, что частота регистрации информации в строке сильно (по крайней мере, в 100 раз) отличается от частоты регистрации строк. Это приводит к тому, что высокочастотные шумы содержатся, в основном, в строках СЗМ изображения. Низкочастотные шумы могут изменять положение строк относительно друг друга. Кроме того, часто во время сканирования изменяется расстояние зонд-образец вследствие микродвижений в элементах конструкции измерительной головки микроскопа или вследствие изменения состояния рабочей части зонда (например, захвата кончиком зонда микрочастицы с поверхности и др.). Это приводит к тому, что на СЗМ изображении появляются ступеньки, параллельные направлению сканирования, связанные со смещением одной части СЗМ кадра относительно другой (рис. 33 (а)). Избавиться от таких дефектов СЗМ изображений можно с помощью процедуры выравнивания кадра по строкам. В каждой строке сканирования находится среднее значение рельефа:

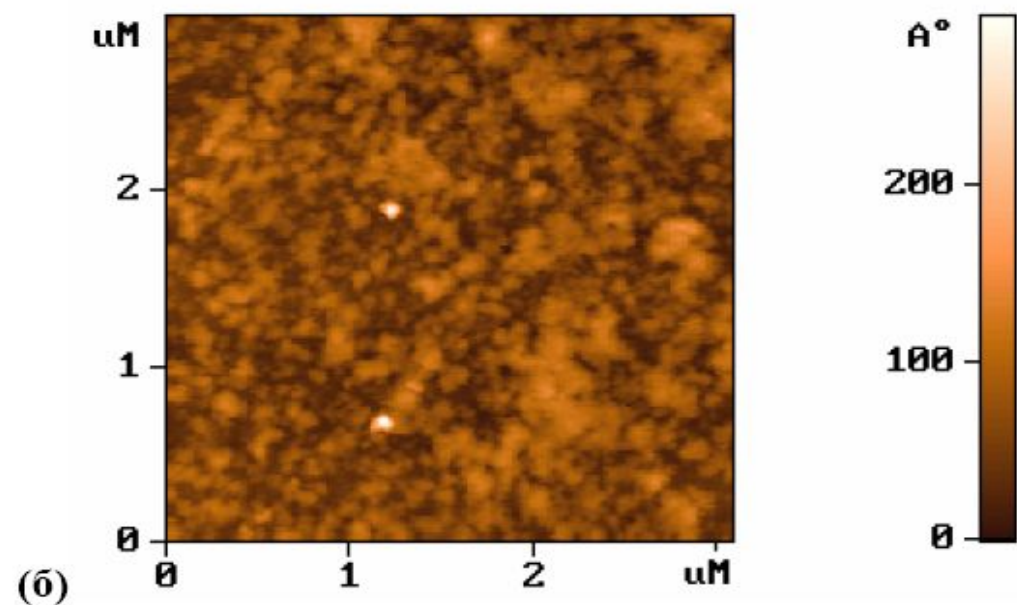
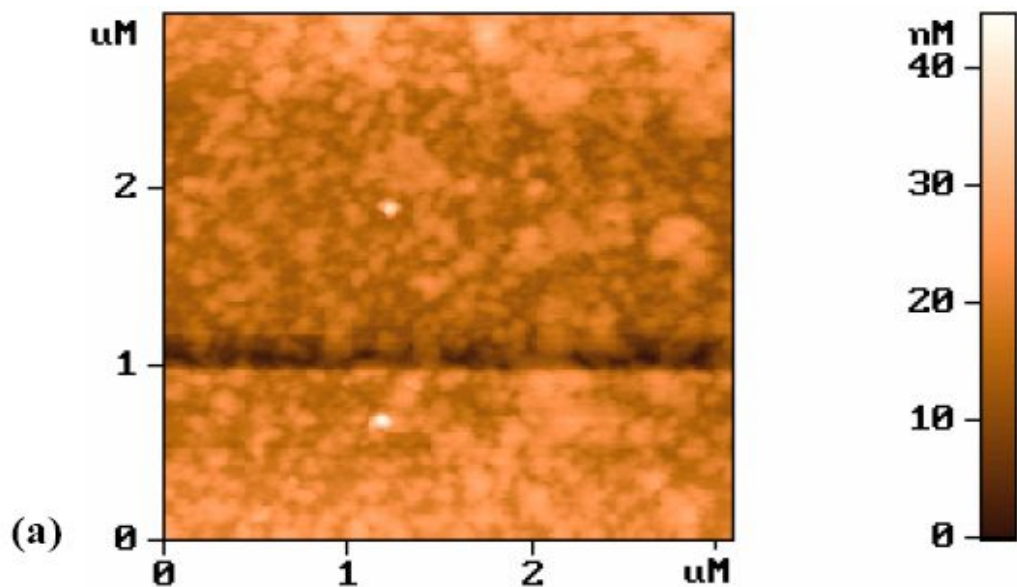
$$\bar{Z}_j = \frac{1}{N} \sum_i Z_{ij}.$$

А затем из значений в каждой строке кадра вычитаются соответствующие средние значения:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \bar{Z}_j,$$

так что в новом кадре в каждой строке среднее будет равно нулю. Это приводит к тому, что ступеньки, связанные с резкими изменениями среднего значения в строках, будут удалены из кадра.

**На рис. 33 представлен результат выравнивания по строкам
реального АСМ изображения поверхности.**



**Рис. 33. АСМ
изображения
поверхности образца
(а) — до усреднения
по строкам; (б) —
после усреднения**

Преобразование Фурье. Линейная фильтрация в частотной области

Линейная фильтрация изображений может осуществляться как в пространственной, так и в частотной области. При этом считается, что "низким" пространственным частотам соответствует основное содержание изображения - фон и крупноразмерные объекты, а "высоким" пространственным частотам - мелкоразмерные объекты, мелкие детали крупных форм и шумовая компонента.

Традиционно для перехода в область пространственных частот используются методы, основанные на *преобразовании Фурье*.

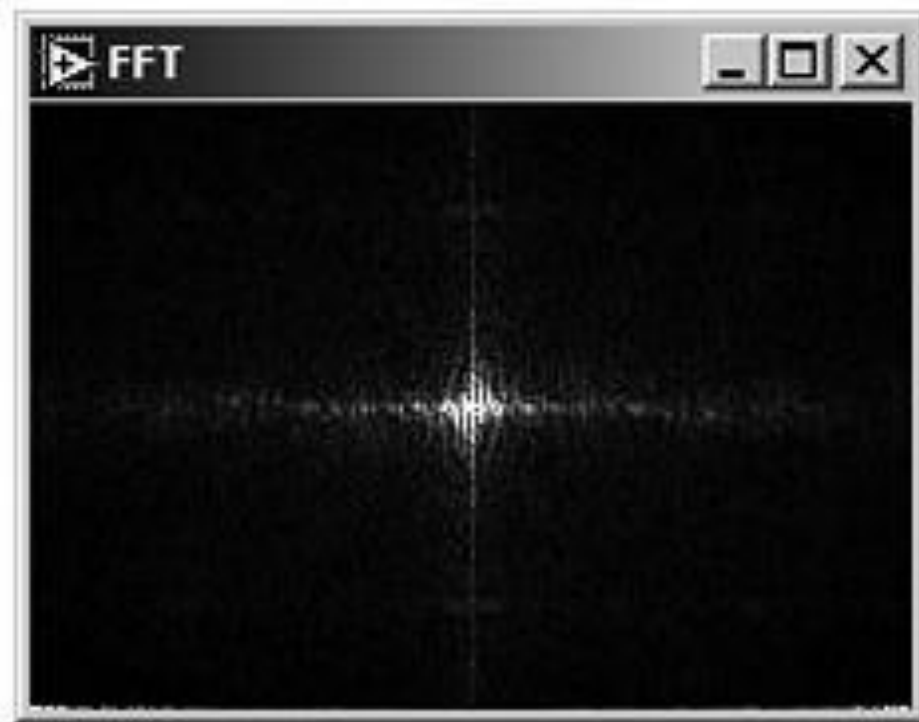
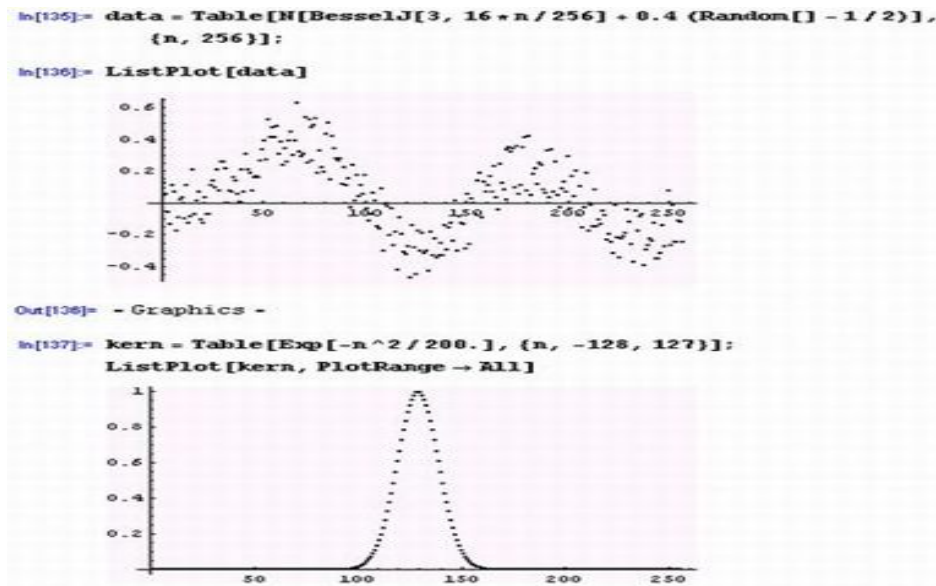
Преобразование Фурье — операция, сопоставляющая функции вещественной переменной другую функцию вещественной переменной. Эта новая функция описывает коэффициенты («амплитуды») при разложении исходной функции на элементарные составляющие — гармонические колебания с разными частотами. Преобразование Фурье функции вещественной переменной является интегральным и задаётся следующей формулой:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ix\omega} dx.$$

Разные источники могут давать определения, отличающиеся от приведённого выше выбором коэффициента перед интегралом, а также знака «-» в показателе экспоненты. Но все свойства будут те же, хотя вид некоторых формул может измениться.

Кроме того, существуют разнообразные обобщения данного понятия (см. ниже).

Фур'є - фільтрація



Полутоновое изображение и его Фурье-образ (изображения получены в системе LabVIEW)

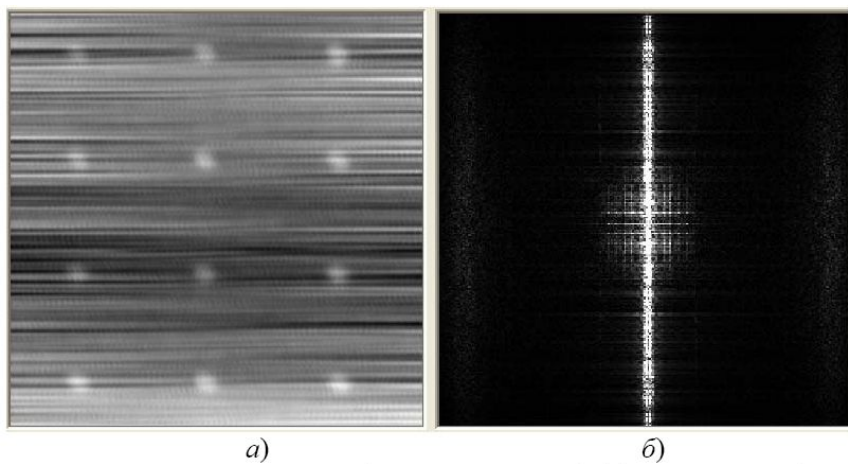


Рис. 1. Поверхность кремния (3.5 мкм x 3.5 мкм) (a) и ее Фурье образ (б)

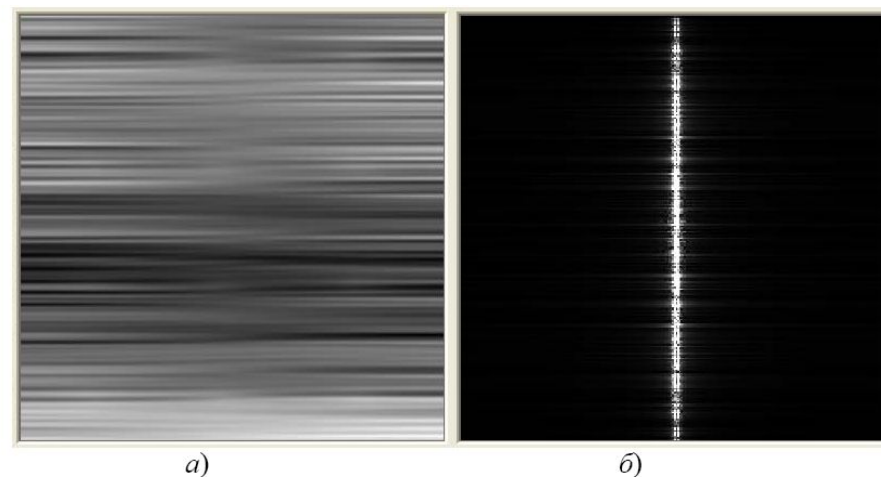


Рис. 2. Шум на изображении (3.5 мкм x 3.5 мкм) (a) и его Фурье образ (б)

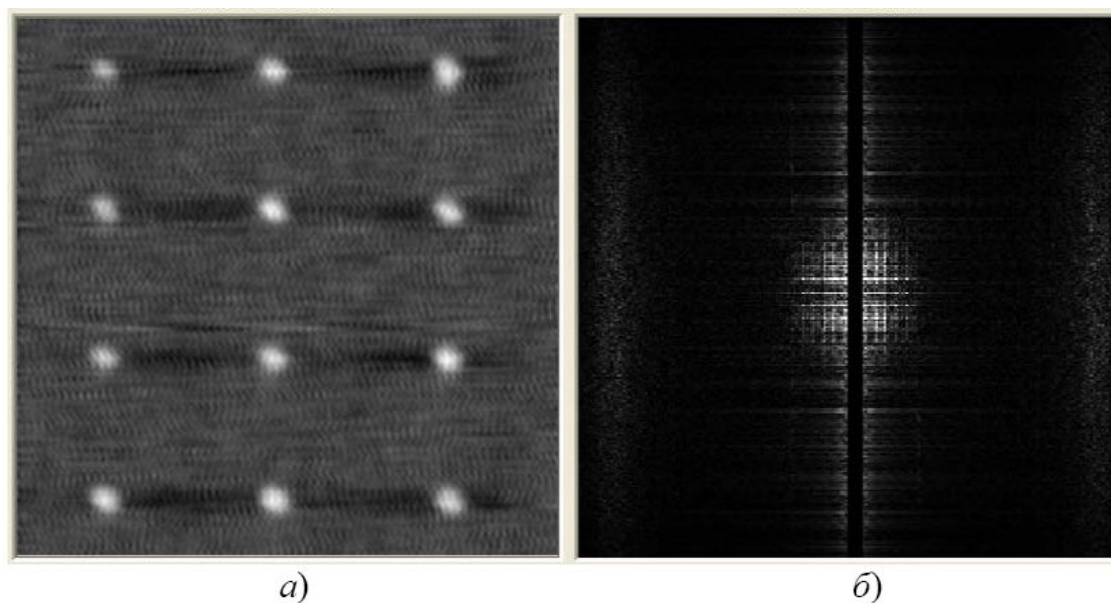


Рис. 3. Применение высокочастотного фильтра к изображению (3.5 мкм x 3.5 мкм) (a) и ее Фурье образ (б).

Фур'є - фільтрація СЗМ зображень

Одним из мощных методов коррекции СЗМ изображений является спектральная фильтрация на основе преобразований Фурье. Как известно, любая функция может быть представлена в виде интеграла Фурье. В случае СЗМ кадра преобразование Фурье производится над дискретными величинами. На рис. 34 показаны результаты Фурье - фильтрации одного из АСМ изображений реальной поверхности.

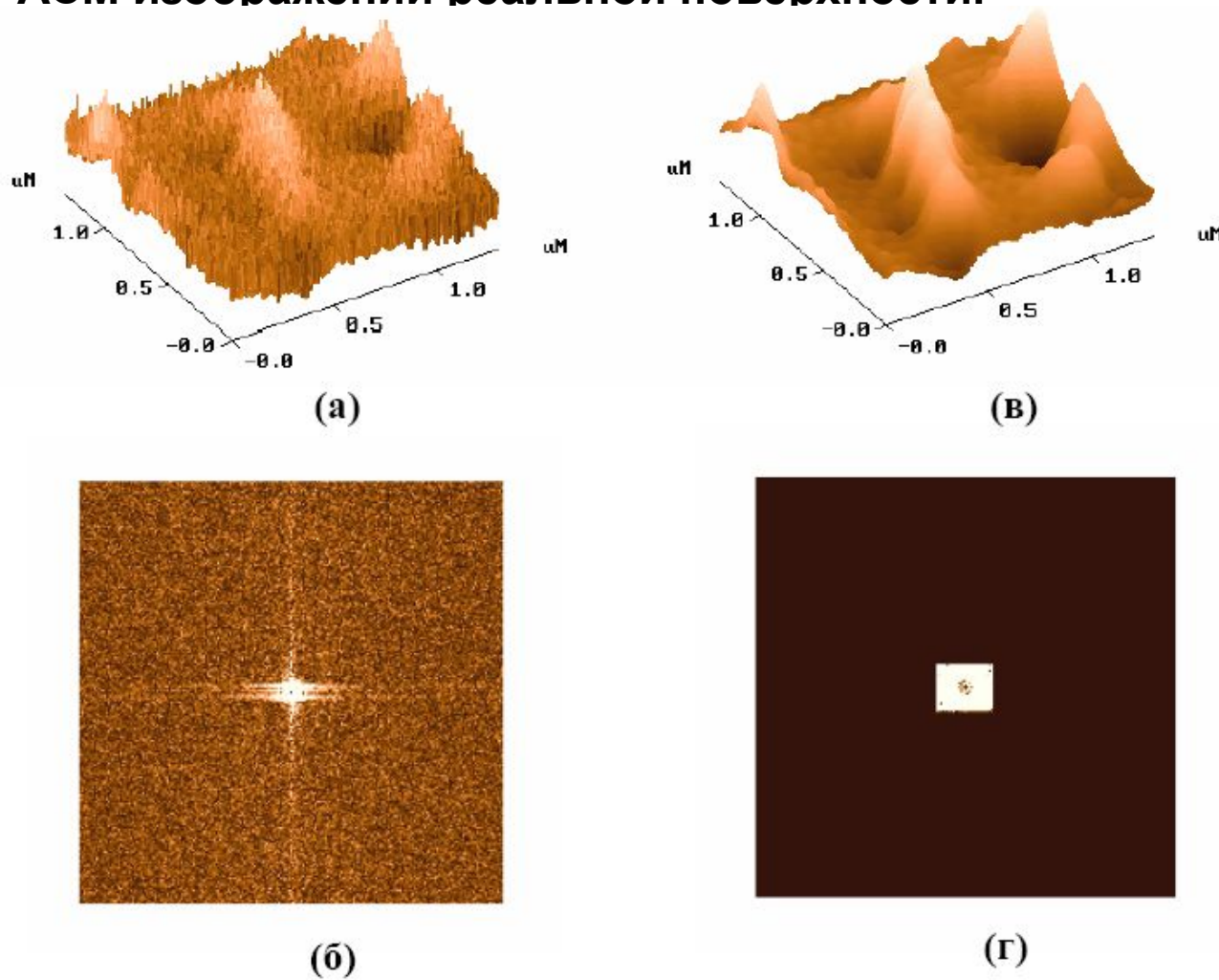


Рис. 34. Пример применения Фурье-фильтрации к АСМ изображению поверхности (а) – исходное АСМ изображение, (в) – отфильтрованное изображение, (б) – спектр исходного изображения, (г) – обработка спектра фильтром низких частот

Методи відновлення поверхні по її СЗМ зображенню

Одним из недостатков, присущих всем методам сканирующей зондовой микроскопии, является конечный размер рабочей части используемых зондов. Это приводит к существенному ухудшению пространственного разрешения микроскопов и значительным искажениям в СЗМ изображениях при сканировании поверхностей с неровностями рельефа, сравнимыми с характерными размерами рабочей части зонда (рис. 35, а).

Фактически получаемое в СЗМ изображение является "сверткой (накладкой)" зонда и исследуемой поверхности. Процесс "свертки" формы зонда с рельефом поверхности проиллюстрирован в одномерном случае на рис. 35.

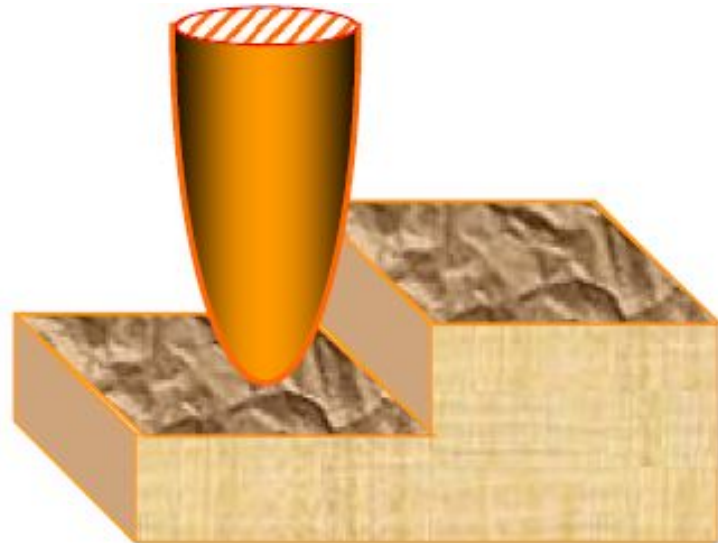


Рис. 35, а. Схема виникнення спотворень внаслідок кінечного розміру зонда і наявності ступеньок.

Свертка функций $s(t)$ и $r(t)$ определяется как

$$s * r \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) r(t - \tau) d\tau.$$

На практике приходится иметь дело с дискретной сверткой, в которой непрерывные функции заменяются наборами значений в узлах равномерной сетки (обычно берется целочисленная сетка):

$$(r * s)_j \equiv \sum_{k=-N}^P s_j - k r_k.$$

Здесь $-N$ и P определяют диапазон, за пределами которого $r(t) = 0$.

Частично данную проблему позволяют решить развитые в последнее время методы восстановления СЗМ изображений, основанные на компьютерной обработке СЗМ данных с учетом конкретной формы зондов. Наиболее эффективным методом восстановления поверхности является метод численной деконволюции, использующий форму зонда, получаемую экспериментально при сканировании тестовых (с хорошо известным рельефом поверхности) структур. Если форма зонда описывается функцией $P(x)$, а форма истинного рельефа поверхности описывается функцией $R(x)$, то СЗМ изображение поверхности получается в виде:

$I(a) = R(x_k) - P(x_k - a)$, при условии $dR/dx = dP/dx$ в точках касания x_k , где a – смещение зонда в системе координат, связанной с поверхностью.

Восстановление исходного рельефа поверхности в данном методе производится путем обратного преобразования. Суть этого метода состоит в том, что СЗМ изображение поверхности повторно (но уже численно) сканируется инвертированным зондом. Тогда изображение восстановленного рельефа поверхности получится в виде $R'(x) = I(x_{k1}) - P(x - x_{k1})$, при условии $dI/dx = dP/dx$ в точках касания x_{k1} . Здесь x_{k1} – абсцисса точки касания функции СЗМ изображения и функции зонда, инвертированной по оси y и по оси x .

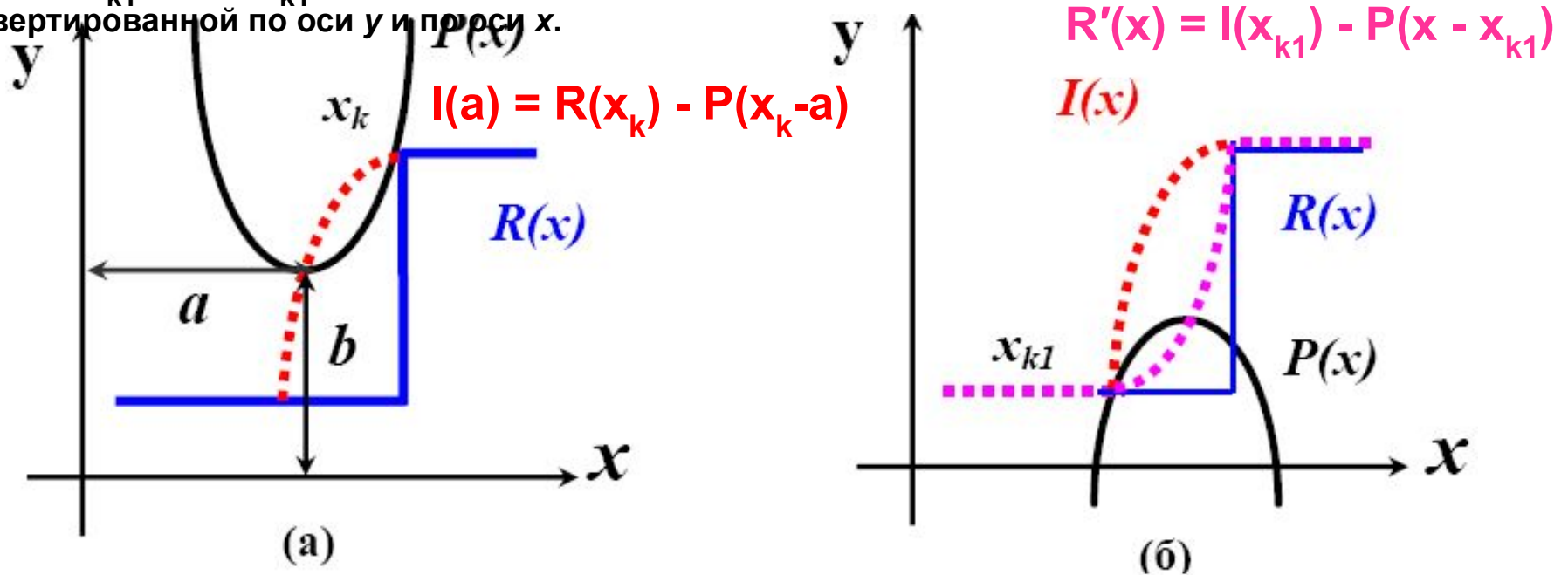


Рис. 35. Схематическое изображение процесса получения изображения в СЗМ (а) и процесса частичного восстановления рельефа с учетом конечных размеров и формы зонда (б).

Следует отметить, что полное восстановление поверхности образца возможно лишь при соблюдении двух условий: зонд в процессе сканирования коснулся всех точек поверхности, и в каждый момент зонд касался только одной точки поверхности. Если же зонд в процессе сканирования не может достигнуть некоторых участков поверхности (например, если образец имеет нависающие участки рельефа), то происходит лишь частичное восстановление рельефа.

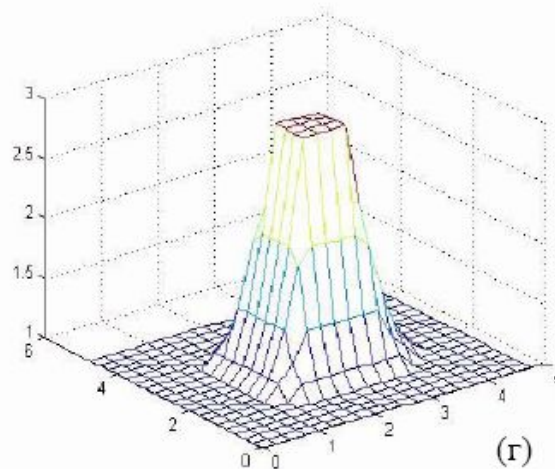
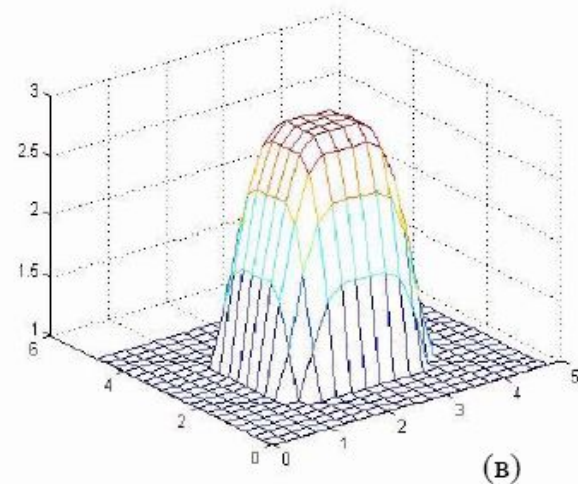
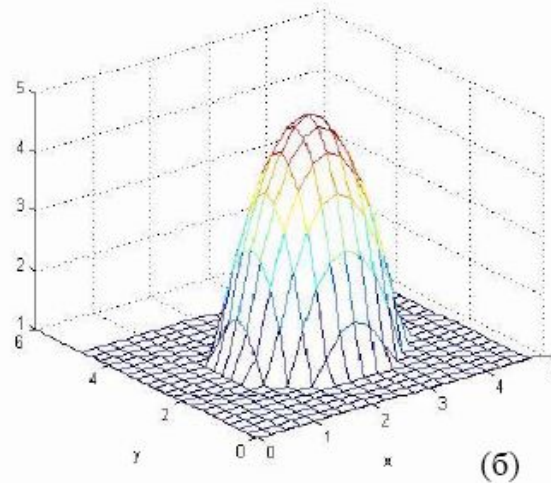
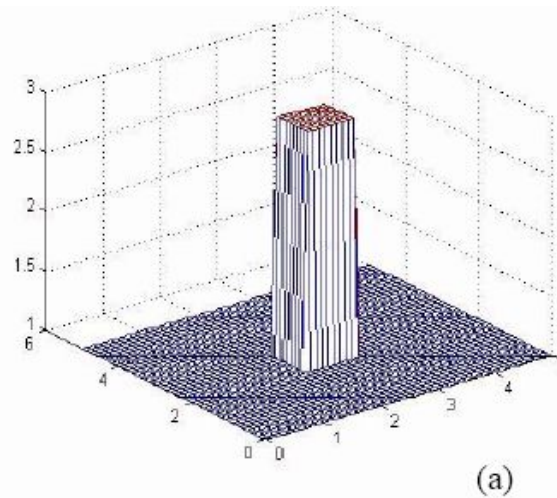


Рис. 36. Моделирование процесса восстановления рельефа поверхности
(а) – Исходная поверхность с включением в виде прямоугольного параллелепипеда;
(б) – модельная форма зонда в виде параболоида вращения;
(в) – результат свертки зонда и исходной поверхности;
(г) – восстановленное изображение поверхности.
(Размеры изображений по осям X, Y, Z указаны в относительных единицах)

Для калибровки и определения формы рабочей части зондов используются специальные тестовые структуры с известными параметрами рельефа поверхности. Виды наиболее распространенных тестовых структур и их характерные изображения, полученные с помощью атомно-силового микроскопа представлены на рис. 37 и 38.

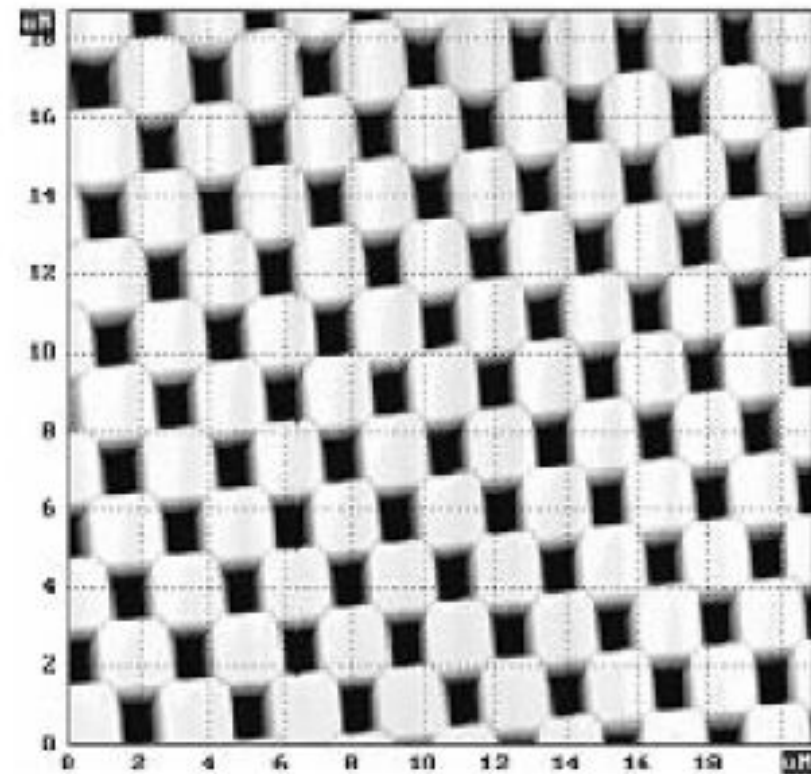
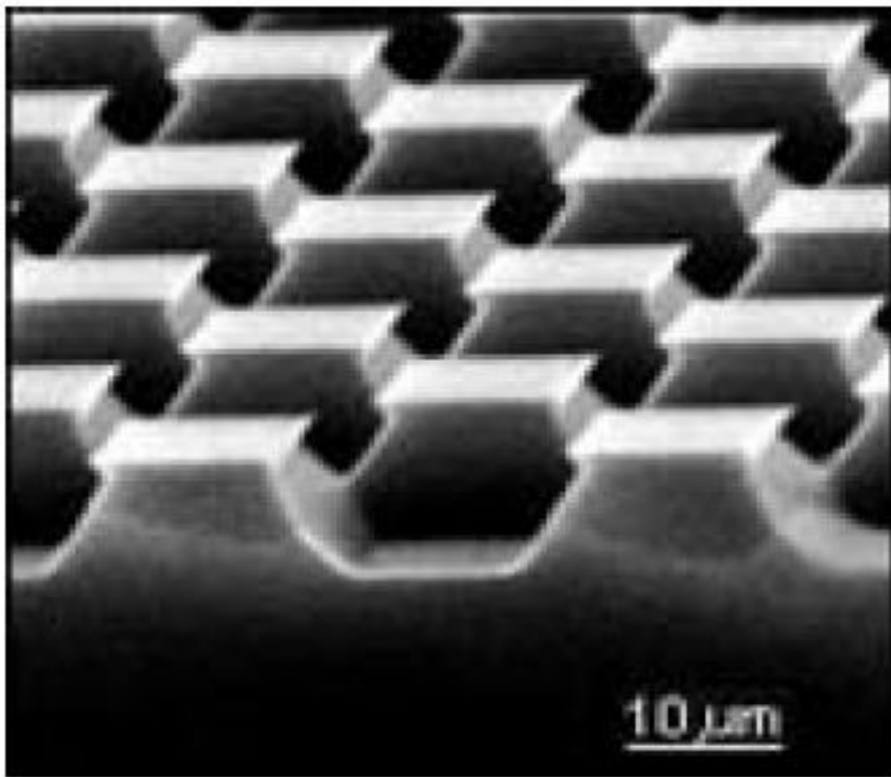


Рис. 37. Прямоугольная калибровочная решетка и ее АСМ изображение

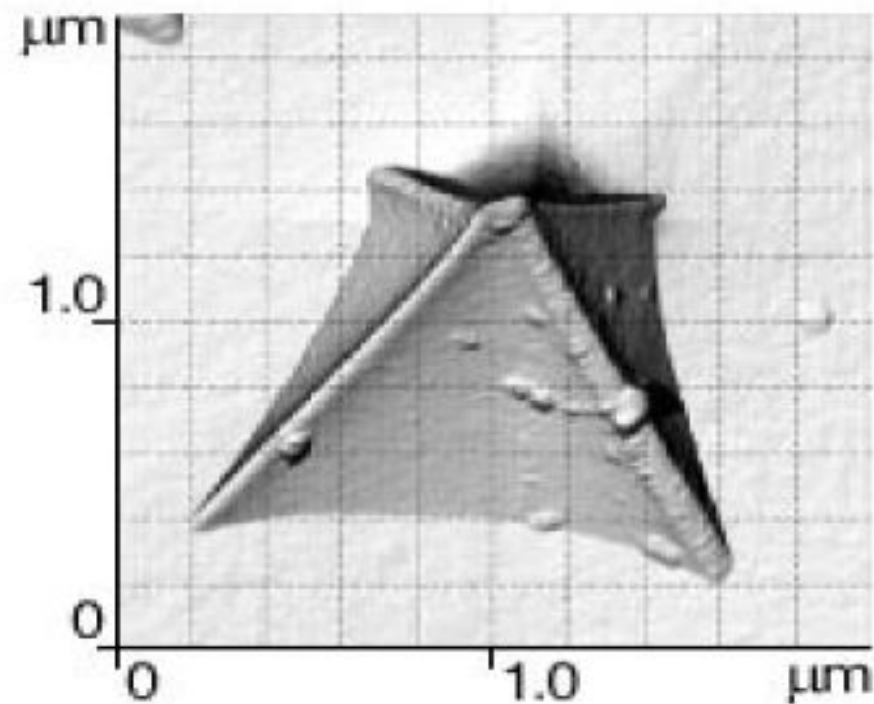
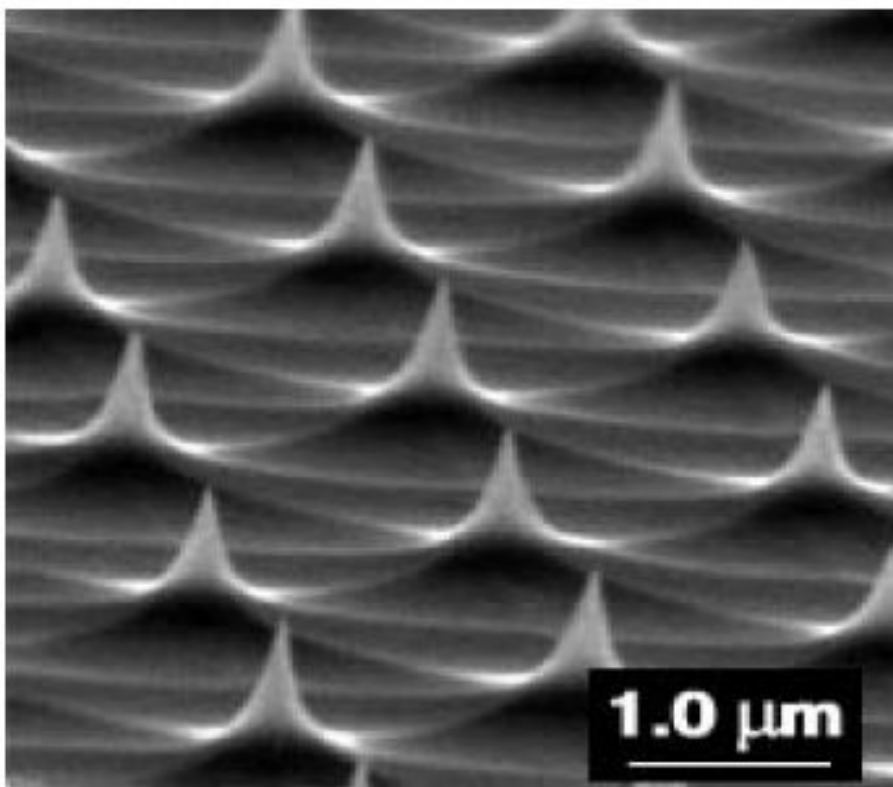


Рис. 38. Калибровочная решетка в виде острых шипов и ее АСМ изображение с помощью зонда пирамидальной формы

Калибровочная решетка в виде острых шипов позволяет хорошо прописывать кончик зонда, в то время как прямоугольная решетка помогает восстановить форму боковой поверхности. Комбинируя результаты сканирования данных решеток, можно полностью восстанавливать форму рабочей части зондов.

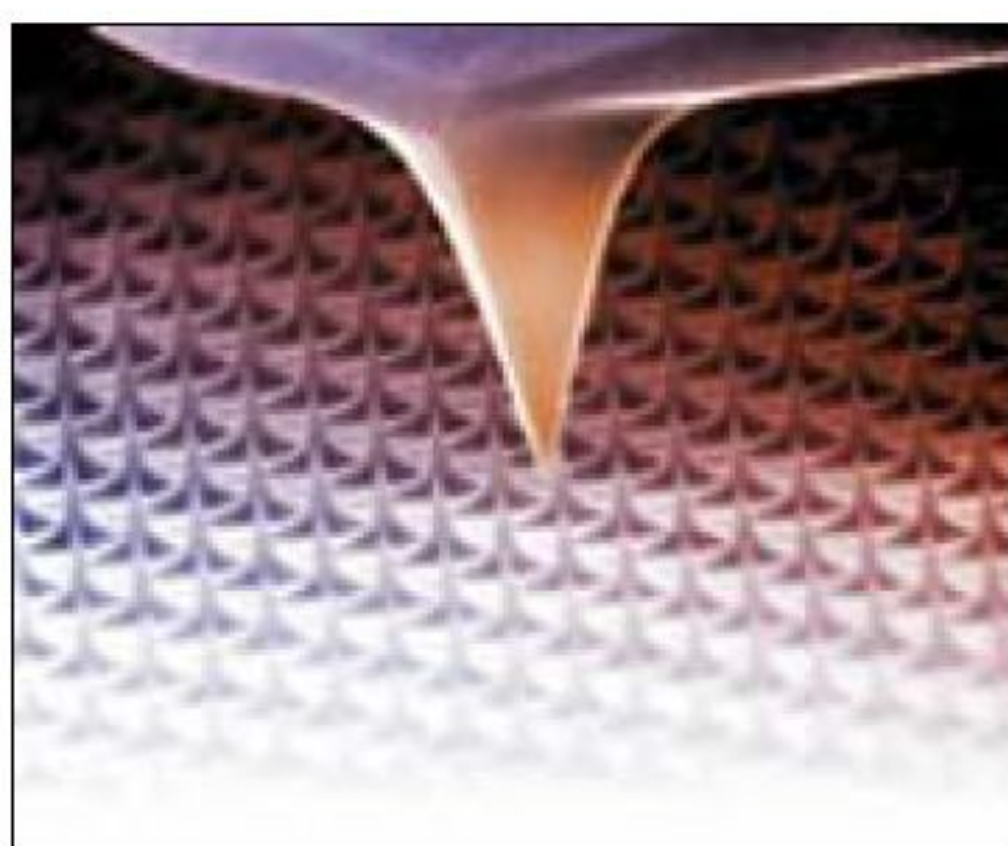


Рис. 39. Электронно-микроскопическое изображение зонда атомно-силового микроскопа в процессе сканирования тестовой структуры