

Нанофізика та нанотехнології. Вступ.

Що таке нано- ?

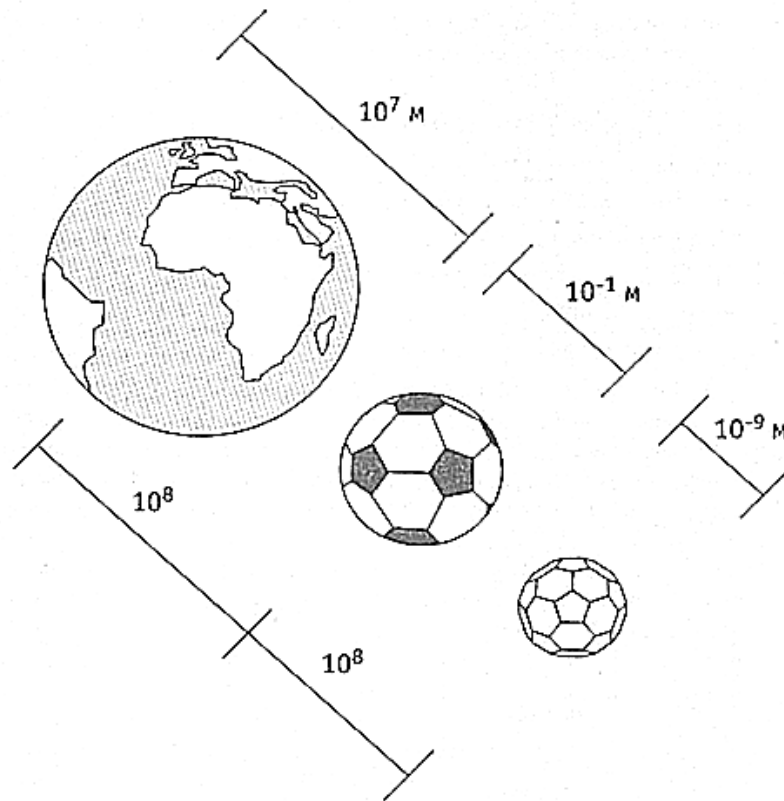


Рис. 14.1. Соотношение диаметров Земли ($\approx 10^7$ м), футбольного мяча ($\approx 10^{-1}$ м) и молекулы C₆₀ ($\approx 10^{-9}$ м = 1 нм)

Ієрархія розмірів

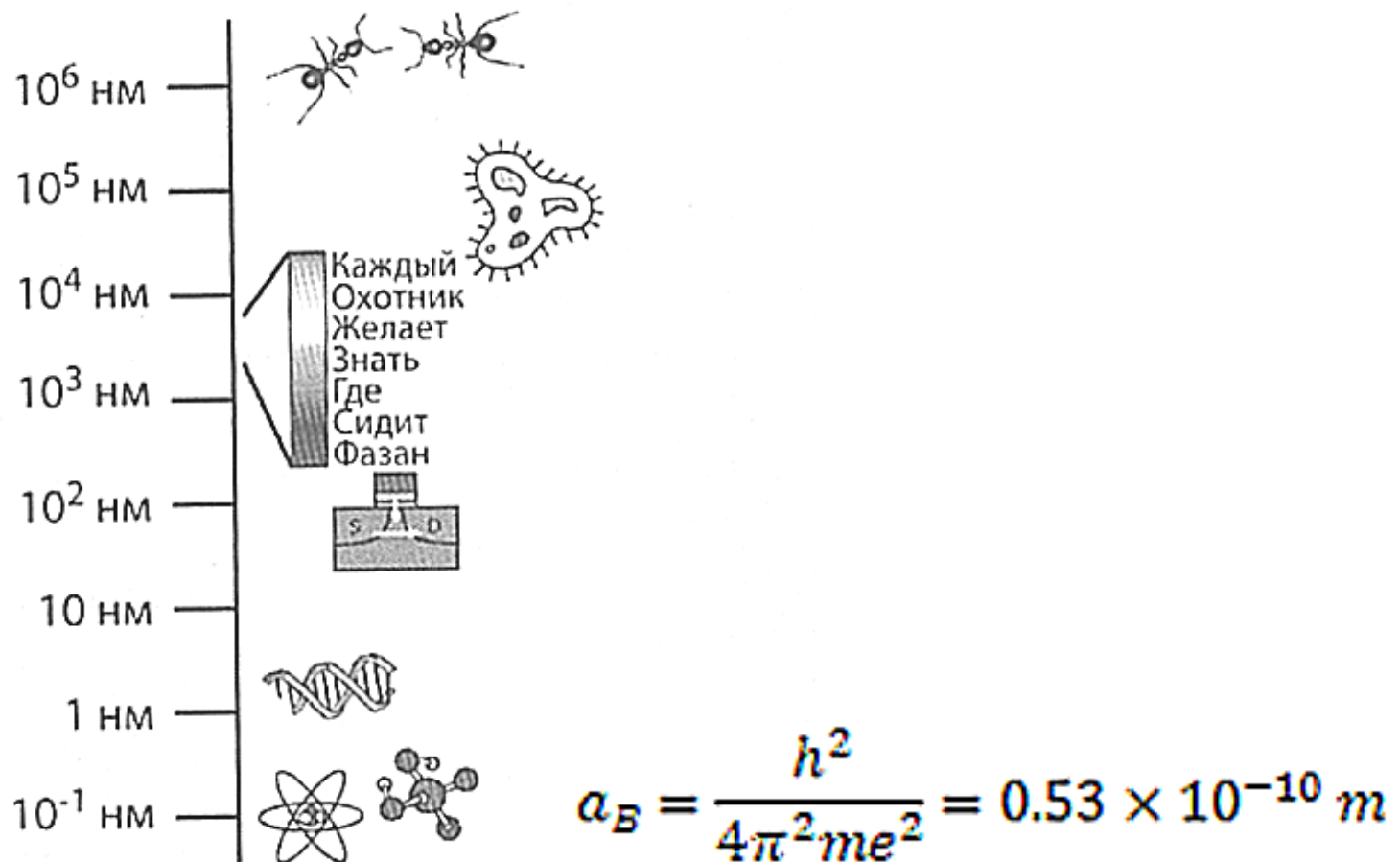


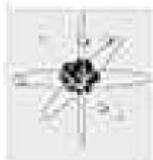
Рис. 14.2. Размеры различных объектов, выраженных в нанометрах.
Фото с сайта www.nanometer.ru

Шкала об'єктів малого розміру

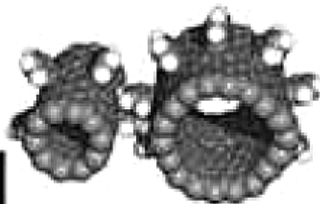


Розміри наноелектронних приладів

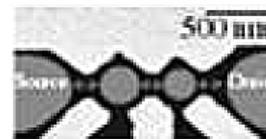
Атом С
0.16нм



ДНК
2.5 нм

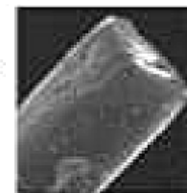


Молекулярная
шестеренка
10нм-100нм



Одноэлектронный
транзистор 300нм

Человеческий волос
50-100мкм

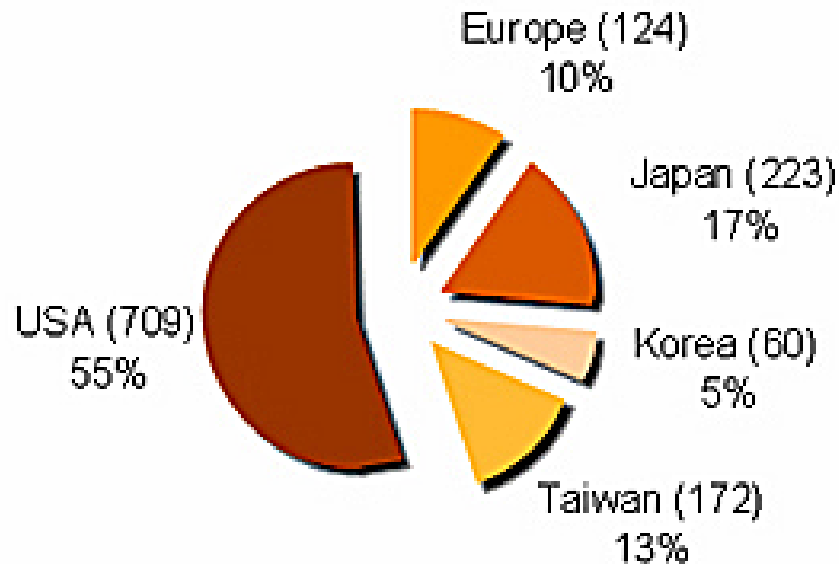


Красные
кровяные
тельца
8мкм



Доли ринку електронних виробів та міжнародна кооперація

<http://www.itrs.net/>



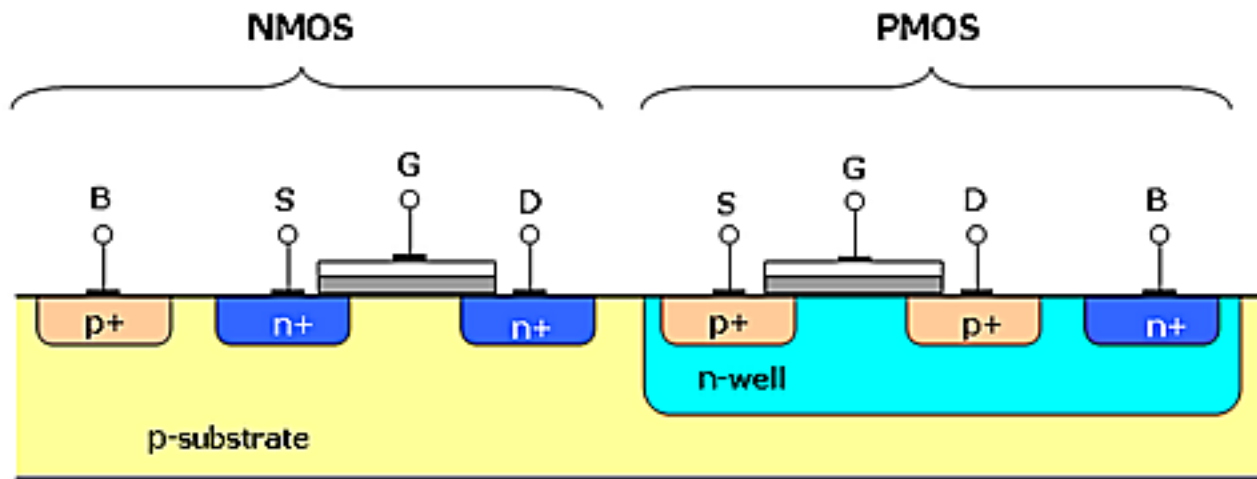
The International Technology Roadmap for Semiconductors

is sponsored by the five leading chip manufacturing regions in the world: Europe, Japan, Korea, Taiwan, and the United States. The sponsoring organizations are the European Semiconductor Industry Association (ESIA), the Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA), the Korean Semiconductor Industry Association (KSIA), the Taiwan Semiconductor Industry Association (TSIA), and the United States Semiconductor Industry Association (SIA).

Технологія CMOS себе вичерпала

CMOS - **Complementary metal-oxide-semiconductor** patented Frank Wanlass in 1963.

CMOS is a technology for constructing integrated circuits. CMOS technology is used in microprocessors, microcontrollers, static RAM, and other digital logic circuits. CMOS technology is also used for several analog circuits such as image sensors (CMOS sensor), data converters, and highly integrated transceivers for many types of communication.



Cross section of two transistors in a CMOS gate, in an N-well CMOS process

Пристрої IMOS

Impact-ionization MOS (I-MOS) transistor

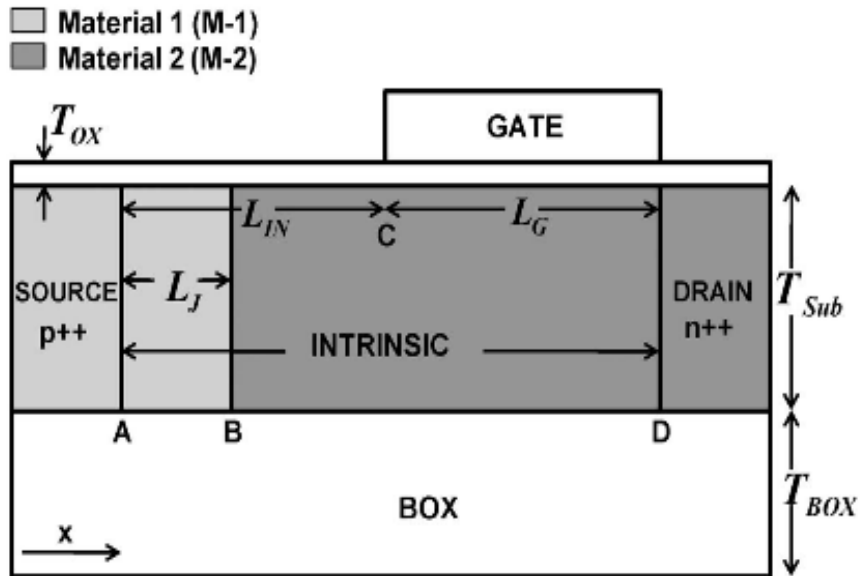


Fig. 1. Basic device structure for n-type E2I-MOS. In all simulations, $L_G = L_{IN}$ and drain voltage $V_D = 0$. Unless mentioned otherwise, the parameters used are as follows: $L_G = L_{IN} = 50$ nm, $L_J = 10$ nm, $T_{OX} = 3$ nm, $T_{Sub} = 40$ nm, $T_{BOX} = 350$ nm, gate work function $\Phi_M = 4.17$ eV, and maximum source/drain doping of 2×10^{20} cm $^{-3}$ with characteristic length of 5 nm.

A novel enhanced electric-field impact-ionization MOS (E2I-MOS) is proposed, which achieves a subthreshold swing of as low as 6 mV/dec at room temperature while reducing the breakdown voltage by about 1.8 V. The E2I-MOS exhibits $\geq 10 \times$ lower OFF -state leakage compared to previously reported I-MOS structures, thus reducing the power consumption and also making the device more scalable. A very high ON current of the order of 1 mA/ μ m can be obtained. Additionally, the device reliability is expected to be improved by confining hot carrier generation away from the gate dielectric region.

Експертні оцінки щодо перспективних напрямків.

Є дві точки зору, які скоріше доповнюють одна одну:

Відомий економіст **Карлота Перес** в своїй книжці «Технологічна революція та фінансовий капітал» демонструє, що з кінця XVIII століття людство пережило п'ять технологічних революцій, кожна з яких породжувала технологічну хвилю, що супроводжувалася поширенням досліджень у відповідних технологічних галузях та завершувалась створенням зразків нової техніки. Останній підйом був пов'язаний саме з винаходом інтегральних мікросхем. ***Буквально за декілька років потенціал технології CMOS буде вичерпано і економіка буде перебувати у рецесії до появи нових технологічних рішень.***

Сьогодні мова йде про, **по-перше**, технічні прийоми, які дозволять продовжити мікромініатюризацію електронних елементів: створення нових видів літографії, використання зондових методів, перехід від планарної до багат шарової а потім і до тривимірної технології, використання нових матеріалів. **По-друге**, вудуться інтенсивні пошуки у різних напрямках розширення застосування мікроелектронних технологій, наприклад для створення мікроелектромеханічних пристроїв (МЕМП) та нанороботів.

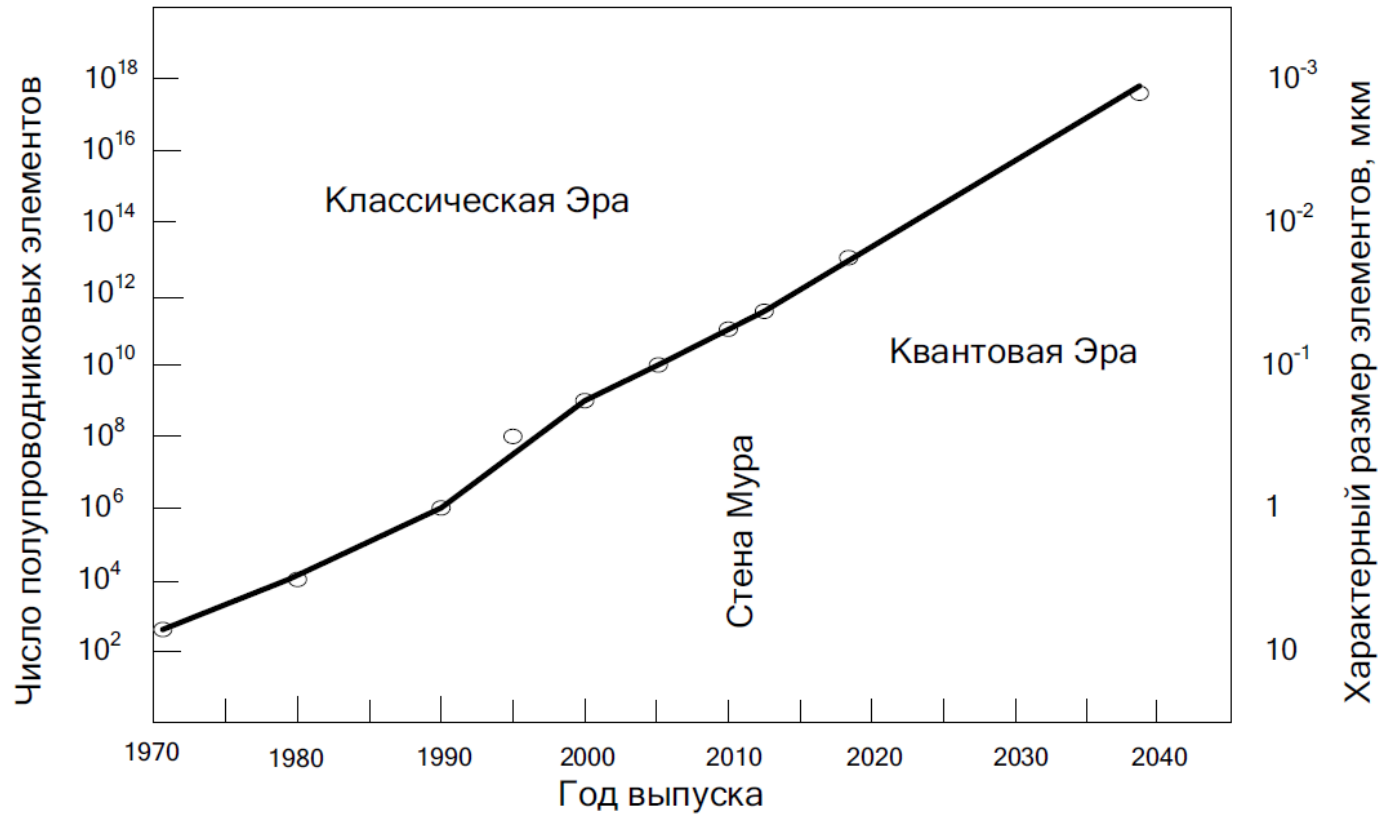
Все це може привести до того, що не тільки закон Мура залишиться справедливим іще на досить довгий термін, але і новий довготерміновий технологічний драйв економіки знову, як і півстоліття тому, буде пов'язаний з прогресом в області електроніки.

Оптимістичний прогноз

В 1965 році один із засновників корпорації Intel Гордон Мур висловив гіпотезу, яку через деякий час стали називати законом Мура: кількість транзисторів на кристалі буде удвоюватися кожні повтора-два роки, а їхні розміри — з тією ж швидкістю будуть зменшуватися. В 1971 році мова йшла про розмір 10 мкм, а сьогодні про розміри 20 нм. Ще зовсім недавно говорили про фізичну межу при розмірах 10 нм. Але потім цю границю пересунули до 6 нм а зовсім недавно віце-президент фірми Samsung, відповідальний за наукові дослідження виступив із заявою про принципово досяжні 2 нм.

Алан Астье, віце-президент по виробництву STMicroelectronics — однієї з найбільш потужних у світі компаній, що займаються розробкою, виготовленням та продажем різноманітних мікроелектронних компонентів, який, так само як і автори прогнозу, не бачить ознак згасання мікроелектронної революції: «В наш час 90 відсотків інновацій базується на мікроелектронних рішеннях, і ця тенденція зростає. Ми не передбачаєм якоїсь зміни в цьому напрямку в найближчій або короткостроковій перспективі. Все великі країни — розвинуті або ті, що інтенсивно розвиваються — навпаки, намагаються приділяти більше уваги та забезпечувати більшу підтримку напівпровідниковій галузі, оскільки розглядають її в якості основної рушійної сили інновацій та соціального прогресу».

Новий погляд на закон Мура



Залежність щільності розташування елементів, описана в книзі Ігнатова А.Н. Ігнатова "Наноелектроника. Состояние и перспективы."

Більше Мура (More than Moore)

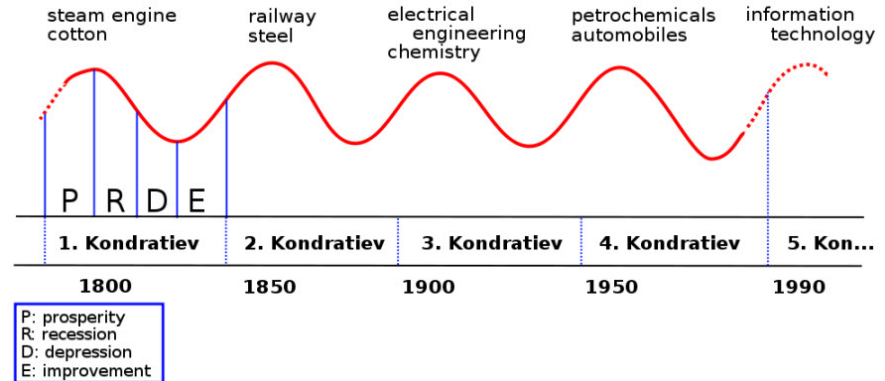
Великі перспективи несе в собі гібридизація інтегральних схем. **Треба в одному корпусі навчитися поєднувати, наприклад, кілька активних електронних компоненти різної функціональності, кілька пасивних елементів, кілька оптоелектронних компонентів та мікроелектронних електромеханічних систем (MEMS).**

Як можлива альтернатива звичайно також розглядається 3D підхід. Нам відомі 3D принтери. Потрібно перенести цей принцип створення 3D об'єкту на інтегральну мікросхему.

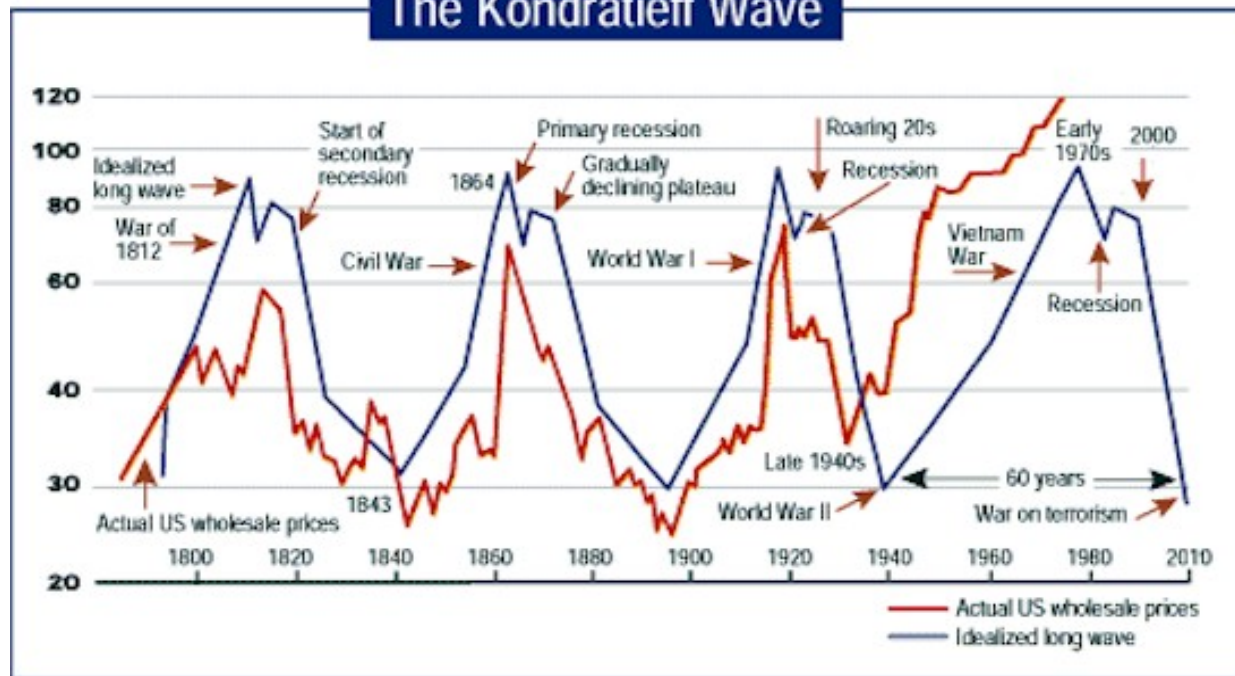
Це неможливо зробити без нових матеріалів. Тому логічно поєднати саму ідею створення 3D інтегральних мікросхем з новими **функціональними матеріалами, бажано такого типу, якими є нанодропи та нанотрубки.**

Значні перспективи пов'язують з нейронними топологіями. Для того, щоб реалізувати такі проекти можливо застосування MEMS та нанороботів. Це може бути використано як для функціонування електронних пристроїв, так і для їх створення.

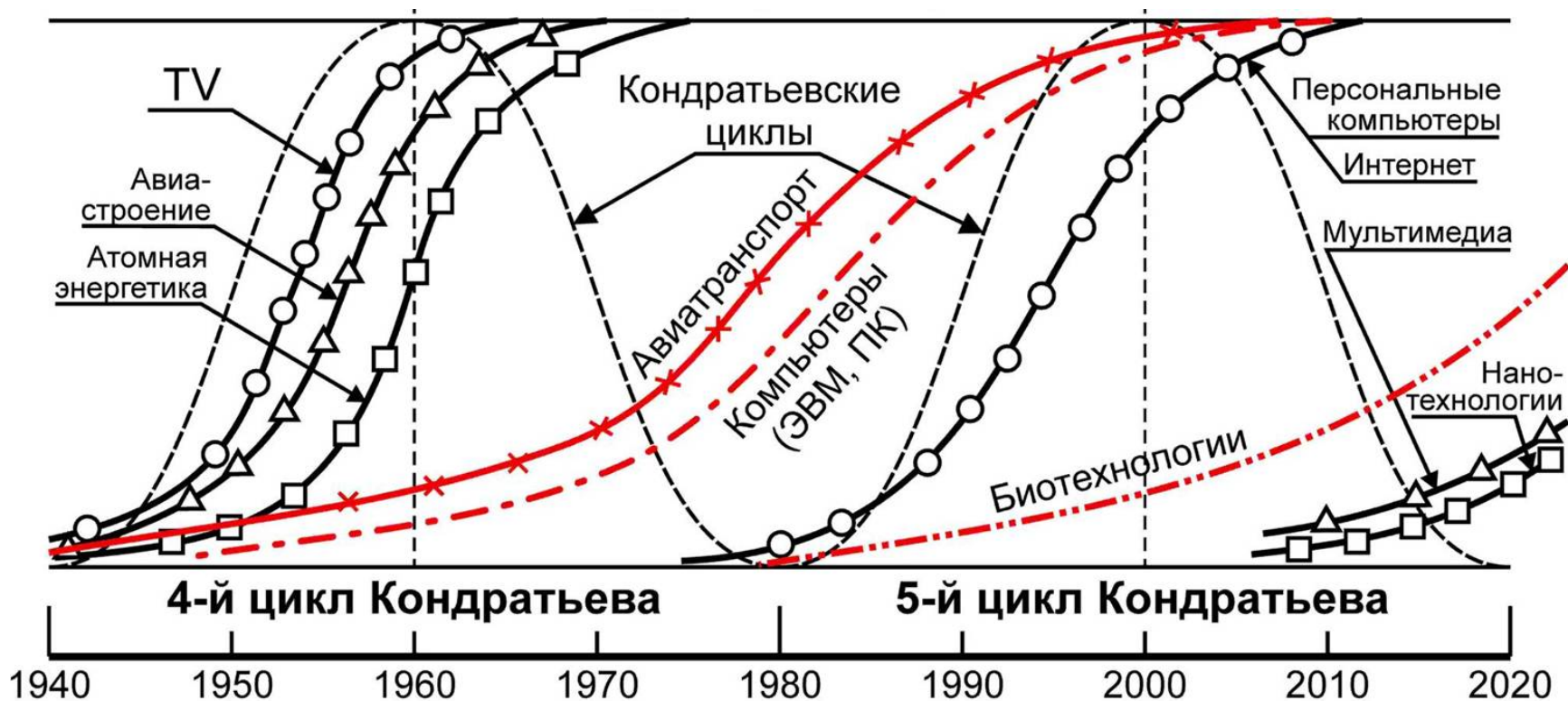
Цикли Кондрат'єва



The Kondratieff Wave



Економічна трактовка та сподівання



Реальні досягнення на даний момент та прагматичні кроки

Великі компанії витрачають на розробку, впровадження та виробництво 1-2 роки. Приблизно через 9-12 місяців після початку виробництва великі компанії виходять на об'єм 20 тис. пластин на місяць.

Сьогодні актуальний розмір пластин у більшості компаній 300 мм, розмір чіпа сягає 140 мм², вихід годних – до 70%.

Найближча перспектива на майбутнє перехід на пластини 450 мм.

Ведучі компанії, такі як Intel, Samsung, TSMC, Globalfoundries, IBM вже організували консорціум по розробці технології на основі пластин 450 мм і збираються вкласти в цей проект в найближчий рік 4,5 млрд. дол. США. В 2015-2016 р.р. намічено розпочати промисловий випуск продукції.

Тенденції: перехід до нових матеріалів, зменшення розмірів доріжок мікросхем DRAM/MPU/ASIC у 2018р. – 14-15 нм, а у 2026 – 5-6 нм, продовжується функціональне шкалювання(зменшення розмірів за рахунок переходу до функціональних механізмів), підвищення продуктивності, мінімізація збиткових струмів та паразитних параметрів, де це можливо відбувається перехід до 3-D топологій. **В реалізації MOSFET відбувається перехід до неklasичних матеріалів, нанодротів, нанотрубок, вживаються заходи по використанню молекулярних елементів, графенових шарів.**

Технології “за межами CMOS”

Технології для покращення збереження інформації:

- 1) на основі REDOX-молекул (ReRAM – пам'ять);
- 2) на основі фероелектричних транзисторів (FeFET) та фероелектричної поляризаційної (ferroelectric polarization ReRAM);
- 3) наноелектромеханічна пам'ять (NEMM).

Технології для покращення логічних схем:

розробка та впровадження промислових зразків FET транзисторів на нанодротах та нанотрубках. Для цього потрібно розв'язати ряд проблем: керування енергією забороненої зони, контролювати розташування, контролювати якість стінок, контролювати тип та концентрацію носіїв заряду, керувати нанесенням діелектричних шарів, формуванням контактів. У разі вирішення цих проблем буде досягнуто розмір елемента 15 нм і частота 80 ГГц.

На сьогодні вже досягнуто діаметру нанодротів 0,5 нм.

Спектр матеріалів такий: IV група – Si, Ge III-V групи – GaN, AlN, InN, GaP, InP, GaAs, InAs та II-VI групи – CdSe, ZnSe, CdS, ZnS.

Провідні технології – молекулярно-променева епітаксія, CVD з використанням каталізаторів, нанолітграфія (наноімпринт та електронна літографія).

Нові різновиди архітектури мікроелектронних пристроїв

Нейроморфні архітектури:

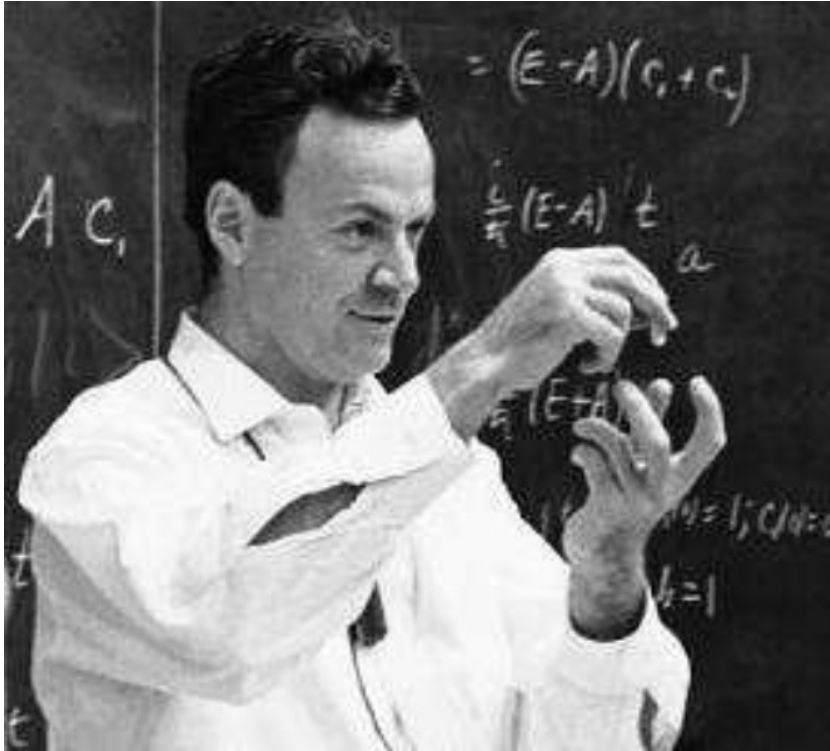


Традиційні електронні обчислювання за парадигмою фон Неймана не здатні конкурувати з властивостями нейроморфної архітектури.

Це можуть бути VLSI системи, які містять в собі електронно-аналогові мікросхеми, що копіюють існуючу в природі **нейробіологічну архітектуру (наприклад, неймережу).**

Прикладом такої системи є сіліконова сітчатка, яка відтворює сітчатку ока. **Задачі, які може розв'язувати така система, відносять до задач нечіткої логіки, розпізнавання образів, аналізу непостійних, розмитих та хаотичних сигналів, що, як правило, властиво нейроткнинам.** Цим системам також характерно розпаралелювання задач. Такі системи можуть використовуватися в AI – системах, сенсорах та для обробки інформації. Аналогом є, зокрема, біохімічні процеси.

Поштовх у розвитку нанофізики



Виступ Р. Фейнмана в
Каліфорнійському технологічному
інституті в 1959 році.

В 1959 році американський фізик, Нобелівський лауреат Р. Фейнман прочитав лекцію, що стала пізніше всесвітньо відомою під назвою “Внизу повним-повнісінько місця: запрошення в новий світ фізики”, в якій була вперше розглянута можливість створення нанорозмірних деталей та пристроїв абсолютно новим способом – шляхом поштучної “атомарної” зборки.

Р. Фейнман заявив: «Поки що ми вимушені користуватися атомарними структурами, які пропонує нам природа». А далі додав: «Але в принципі фізик міг би синтезувати будь-яку речовину за заданою формулою».

Хронологічна таблиця досягнень

1905 - А.Ейнштейн опублікував роботу, в якій довів, що розмір молекули цукру дорівнює 1 нм.

1932 - Вперше вдалося побачити атом в електронний мікроскоп, що просвічує, який був вперше сконструйований.

1938 - побудований скануючий електронний мікроскоп. Трохи пізніше в 1939 році німецький фізик Е. Руска створив перший ефективний електронний мікроскоп, за що отримав Нобелівську премію дещо пізніше - в 1986 році.

1974 - японський вчений К.Танігучі в році при обговоренні проблеми обробки матеріалів вперше ввів термін "нанотехнологія".

1981 - американський вчений Г.Глейтер вперше ввів термін «нанокристалічні» матеріали, а Г.Бінінг та Ч.Гербер. винайшли тунельний мікроскоп.

1985 - англічанин Г.Крото та американці Р. Керл та Р.Смоллі штучно синтезували фулерени.

1986 - Г.Бінінг, С.Куйт та Ч.Гербер (G.Binnig, S.F.Quate, Ch.Gerber) вже сконструювали та випробували атомно-силовий мікроскоп.

1989 - Дональд Ейглер, співробітник фірми IBM виклав назву своєї фірми атомами Ксенона.

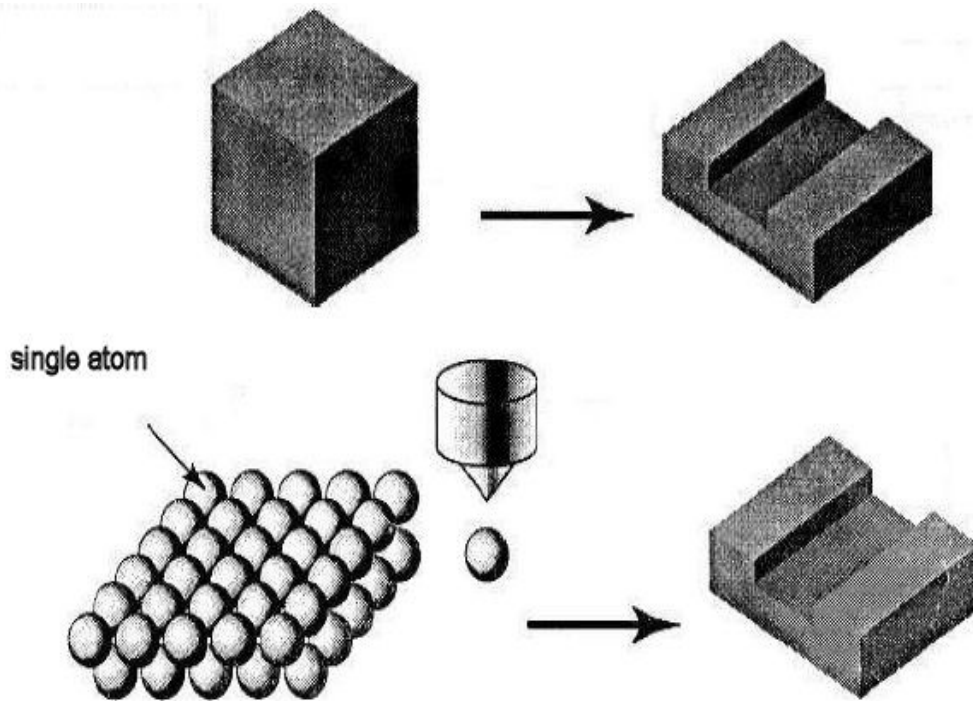
Активізація зусиль в розвитку нанотехнологій

Передові країни світу виділяють на розвиток нанотехнологій значні кошти. Так в 2001 році в США була затверджена Національна Нанотехнологічна Ініціатива (ННІ), на реалізацію якої американський уряд виділив приблизно 500 мільйонів доларів на рік. Основна ідея цієї програми була сформульована наступним чином: «Національна Нанотехнологічна Ініціатива визначає стратегію взаємодії різних федеральних відомств США з метою забезпечення пріоритетного розвитку нанотехнологій, яка повинна стати основою економіки та національної безпеки США в першій половині XXI століття».

В преамбулі до ННІ президент США Б.Клінтон заявив: «Я виділяю 500 мільйонів доларів в поточному році на державну нанотехнологічну ініціативу, яка дозволить нам в майбутньому створювати нові матеріали(що перевищують існуючі по характеристикам в тисячі разів), записати всю інформацію Бібліотеки Конгресу на крихітному пристрої, діагностувати ракові захворювання при появі кількох вражених клітин та добитися інших вражаючих результатів». Запропонована ініціатива розрахована на двадцять років і обіцяє привести до важливих практичних результатів.

Японія, так само, як і США приділяє велику увагу розвитку нанотехнологій. В 2000 році Японська Економічна Асоціація(Кейданрен) організувала спеціальний відділ по нанотехнологіям при промислово-технічному комітеті.

Дві стратегії створення наноструктур



Дві парадигми створення наноструктур:
"top-down" та "bottom-up"

На сьогодні існує дві різні стратегії отримання наноструктур, які базуються на двох принципово різних підходах «зверху-вниз» та «знизу-догори». Перший підхід можна вважати традиційним для виготовлення мікроприладів, адже таким способом за допомогою літографічних методів вже досить давно відбувалося їх виготовлення. Другий підхід «знизу-догори» виник порівняно недавно тільки після появи зондових технологій.

Тунельний зондовий мікроскоп

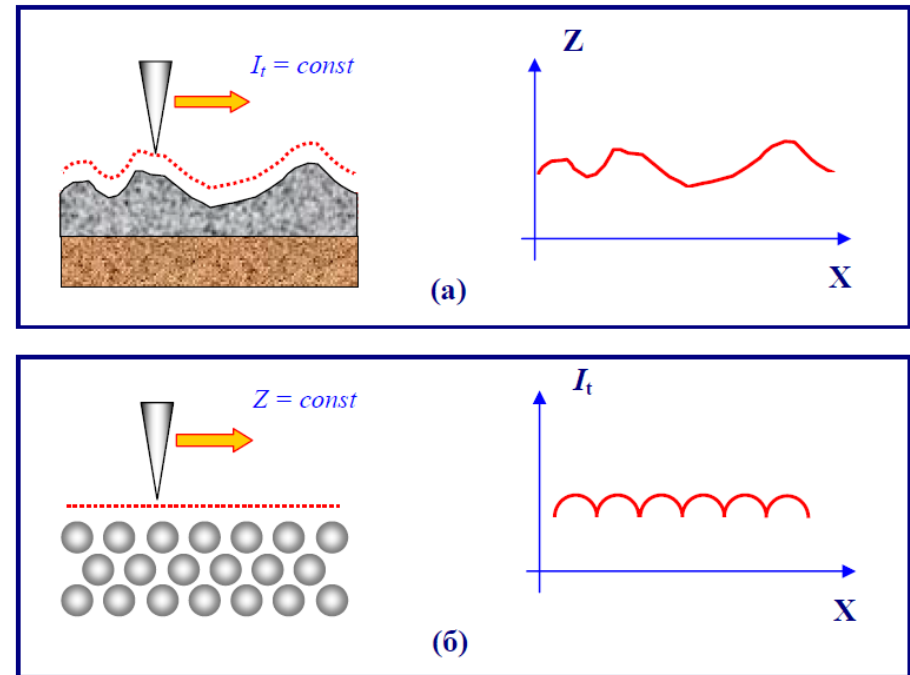
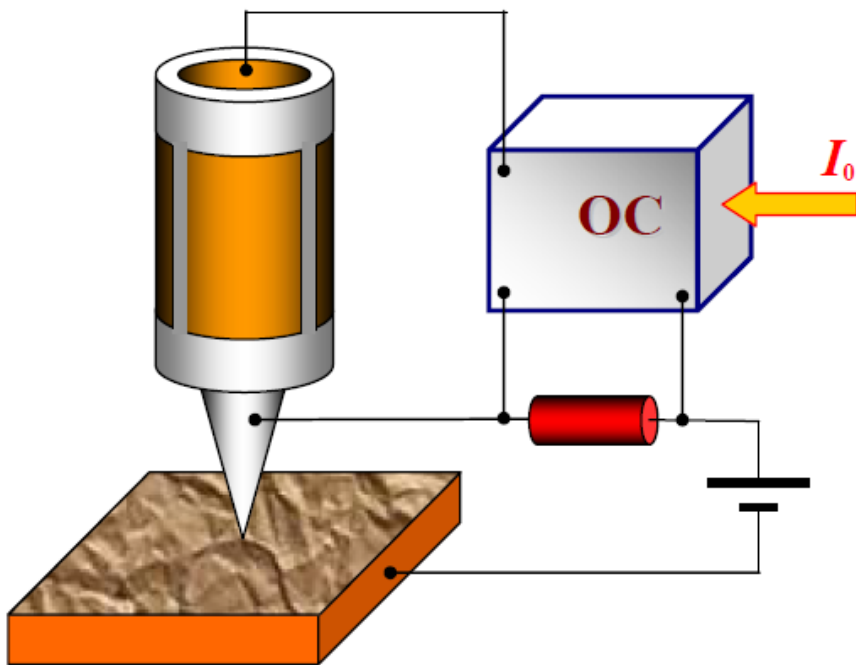


Рис. 43. Формирование СТМ изображений поверхности по методу постоянного туннельного тока (а) и постоянного среднего расстояния (б)

СИЛОВИЙ ЗОНДОВИЙ МІКРОСКОП

1986 р. – Герд Біннінг, Келвін Куейт, Кристофер Гербер

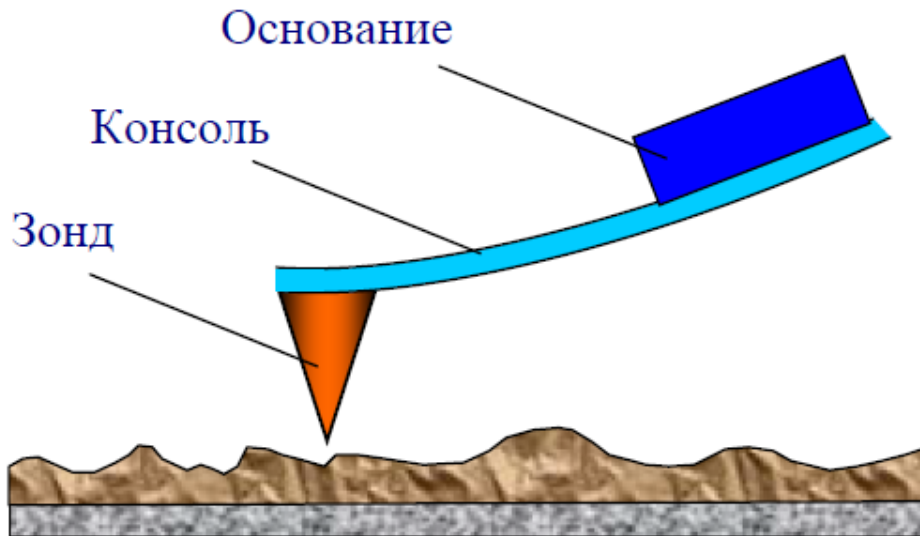


Рис. 60. Схематическое изображение зондового датчика АСМ

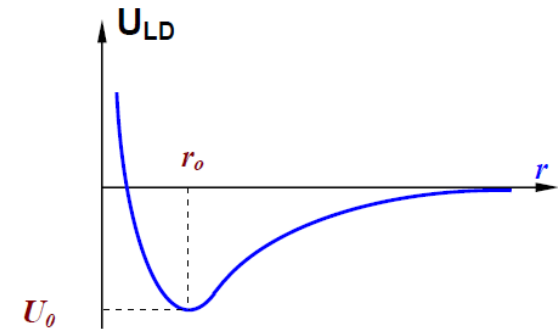


Рис. 61. Качественный вид потенциала Леннарда – Джонса

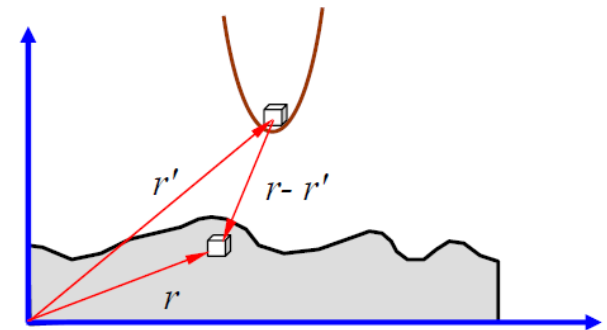
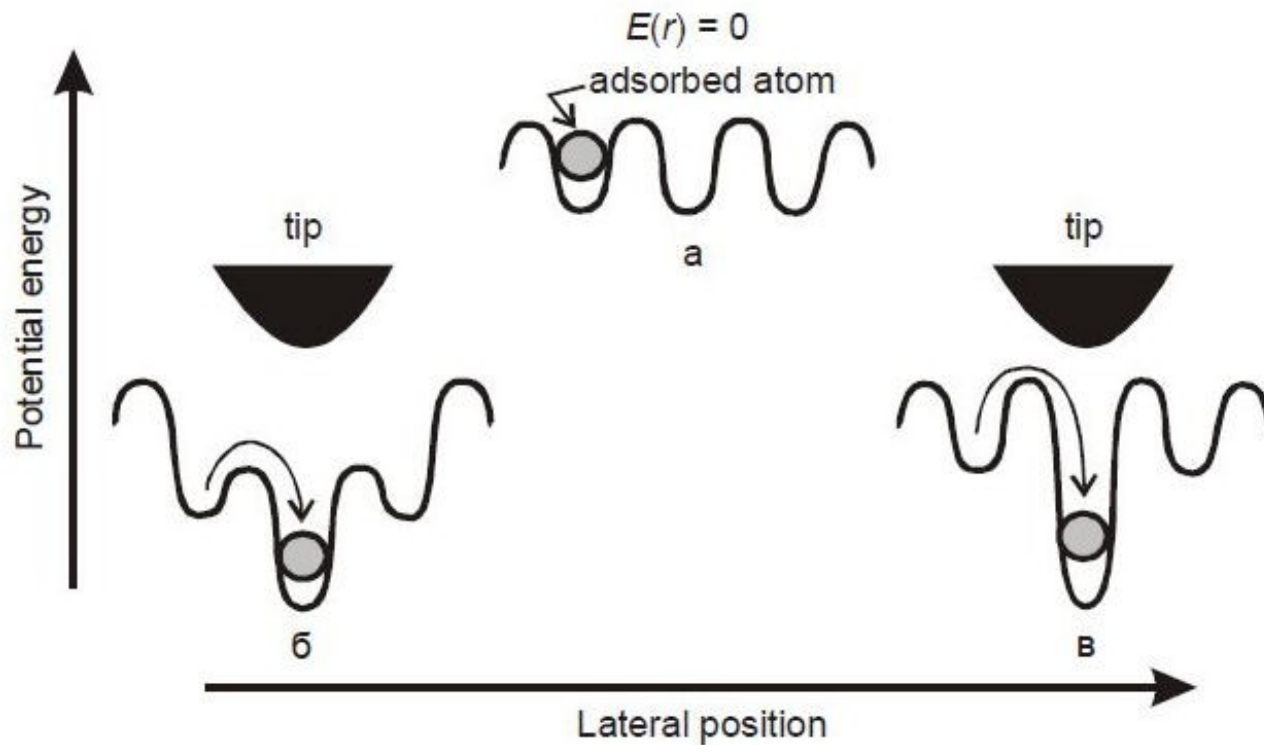


Рис. 62. К расчету энергии взаимодействия зонда и образца

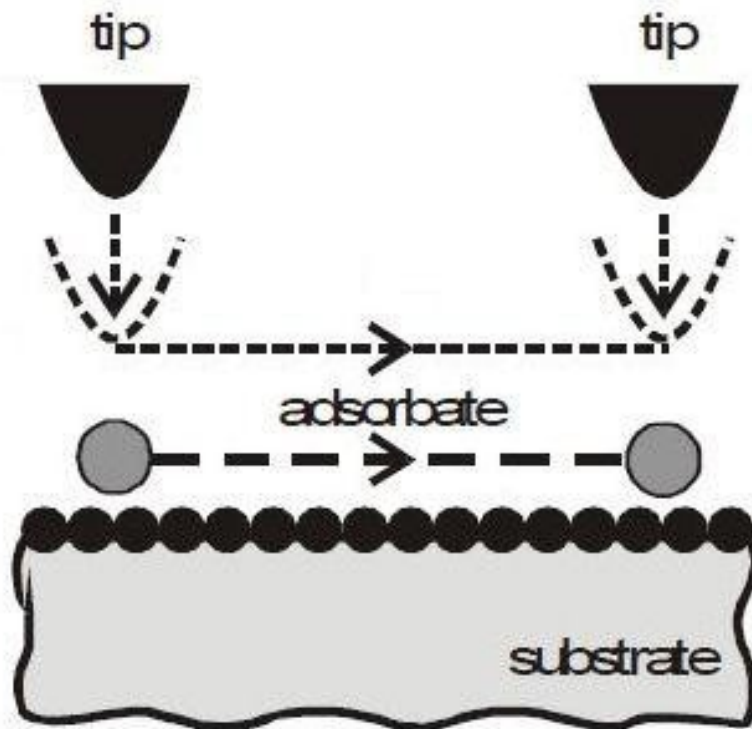
Атомна інженерія: два підходи

Безконтактний метод

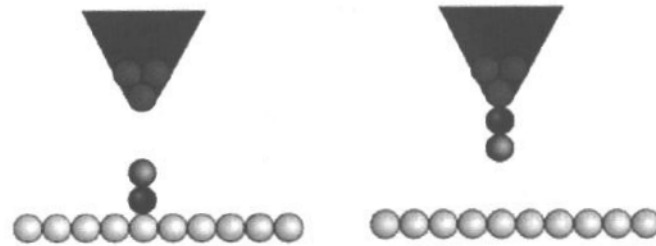


Ковзання атому по поверхні

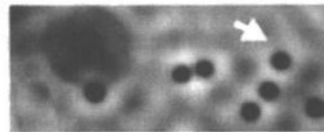
Контактний метод



Приклад структури створеної зондовим методом



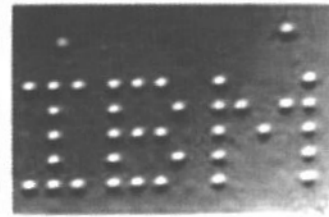
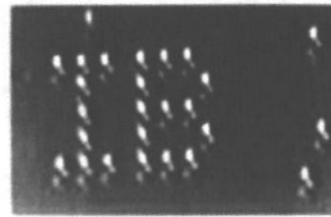
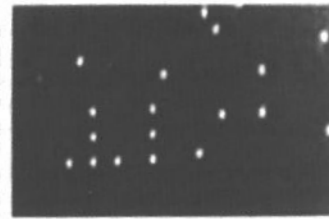
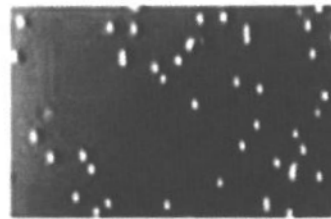
a



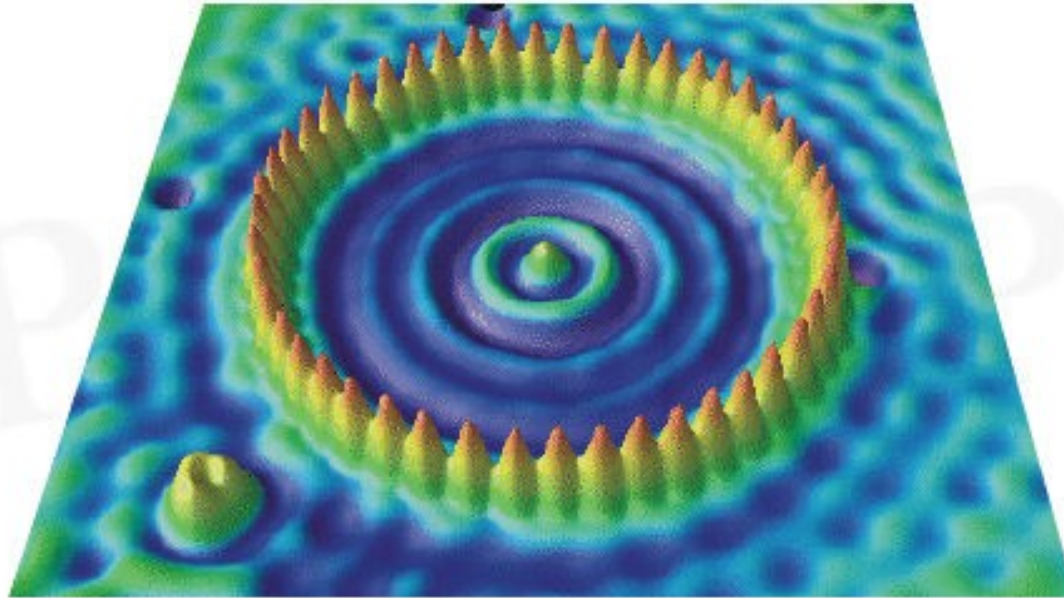
б



в

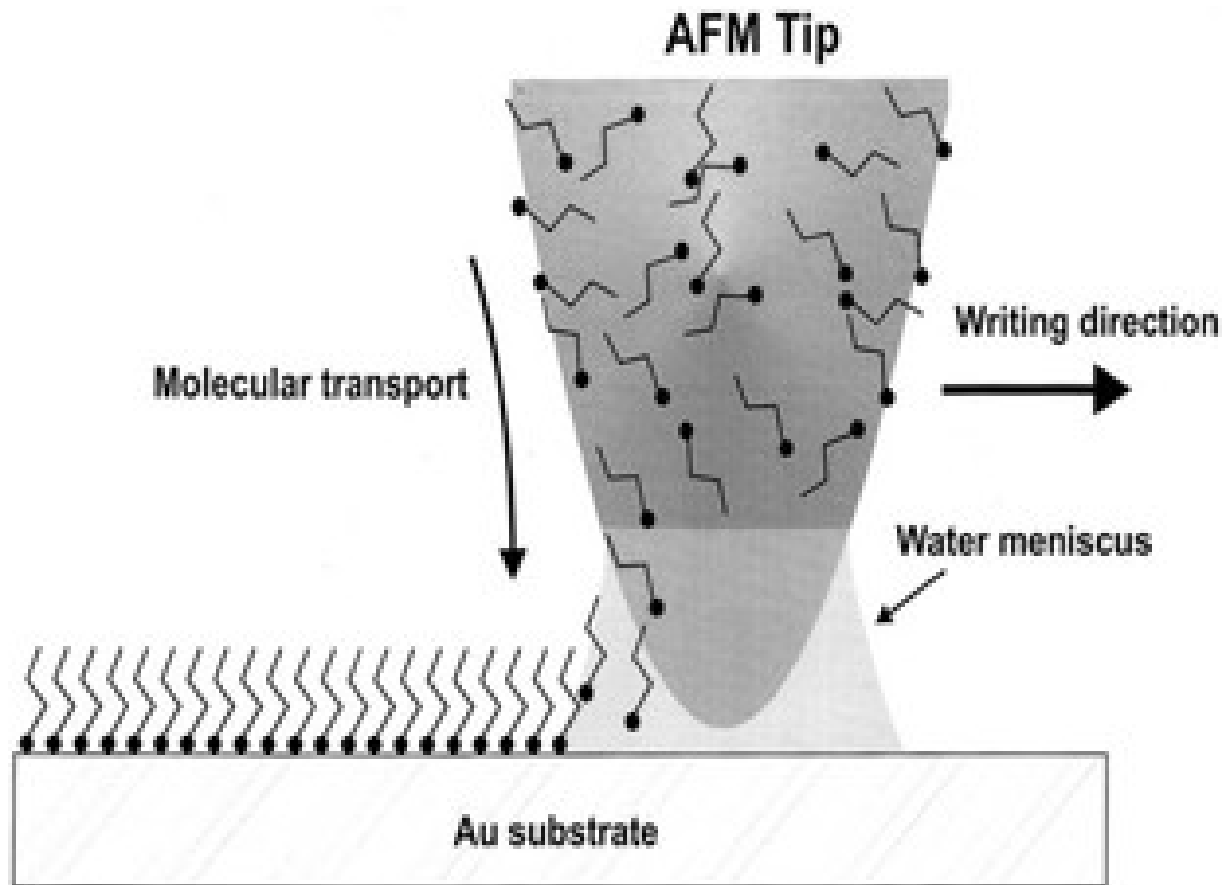


Зразок штучного коралу



Зображення штучно створеного коралу з 48 атомів Fe на поверхні підкладки Si(111) (<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm>).

Пір'єва технологія



Локальні зондові технології

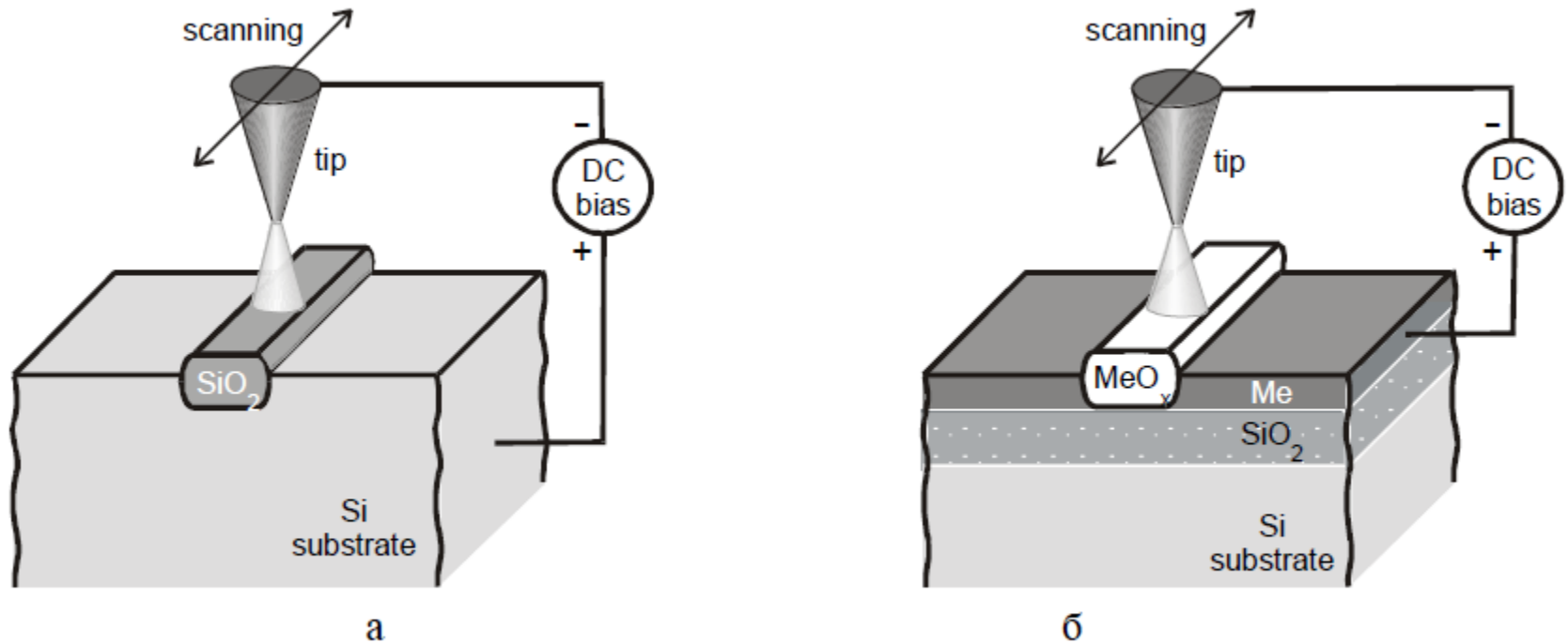
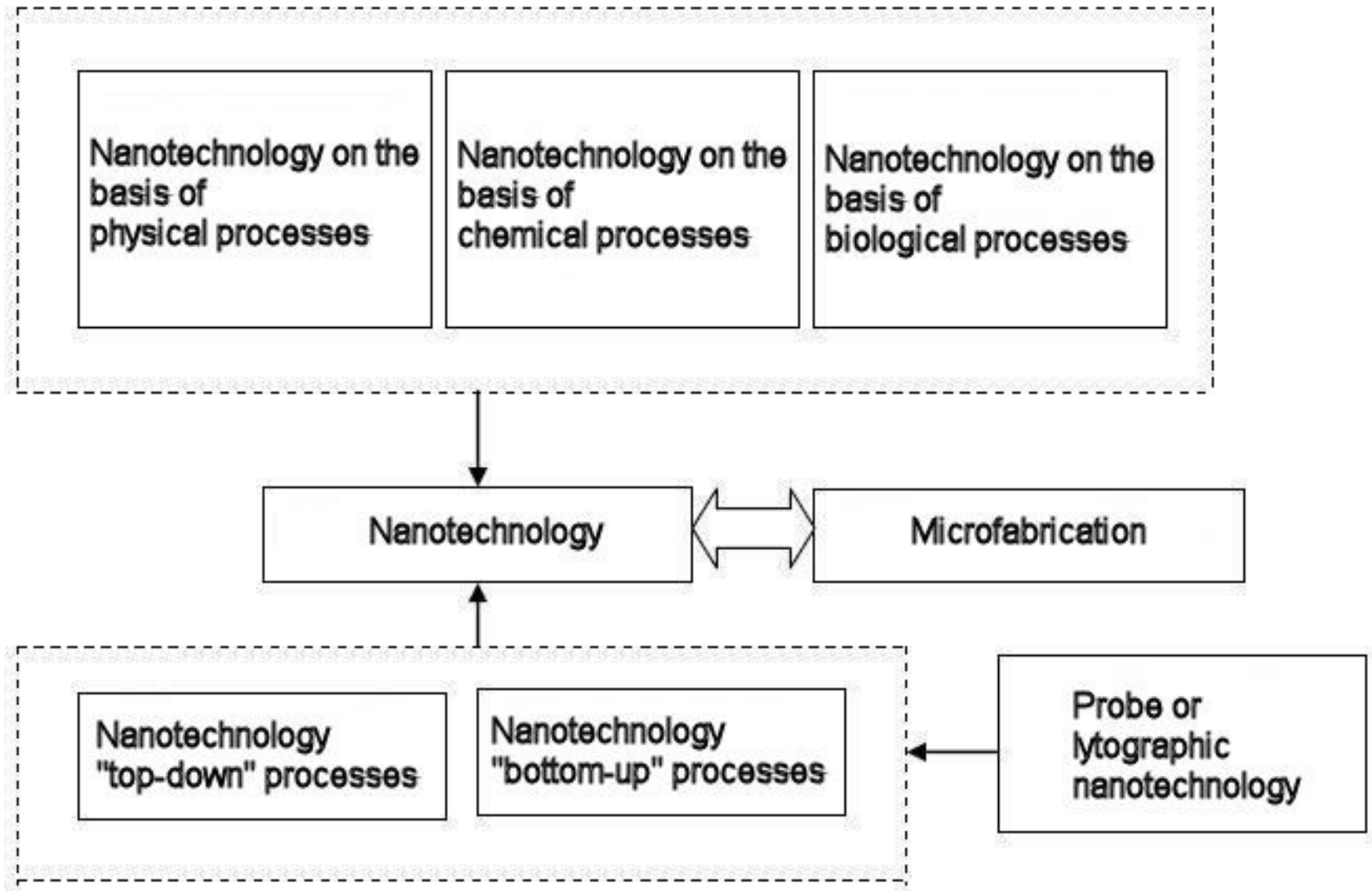
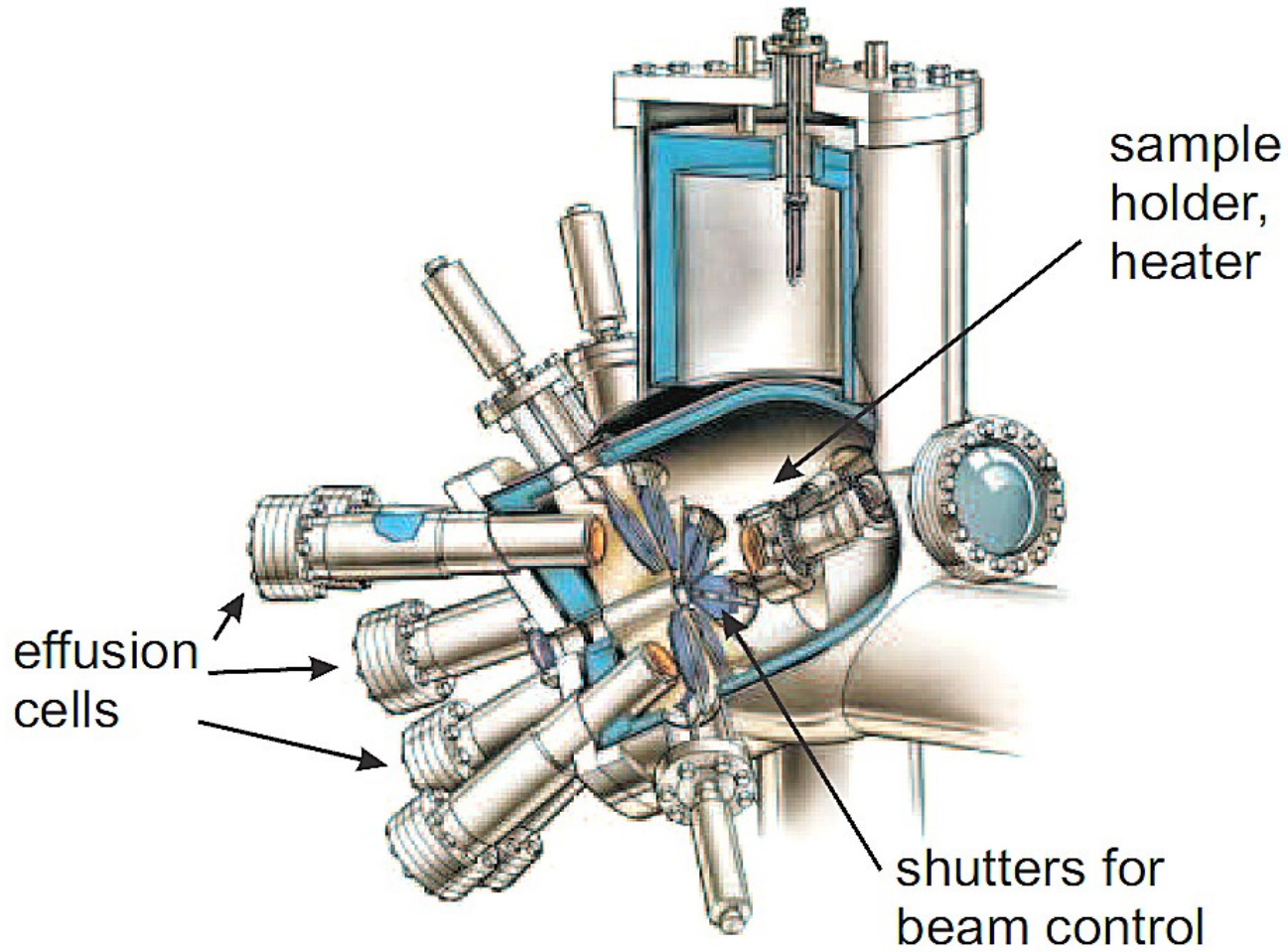


Рис. 3.8. Локальное зондовое окисление кремния (а) и пленки металла (б) [2]

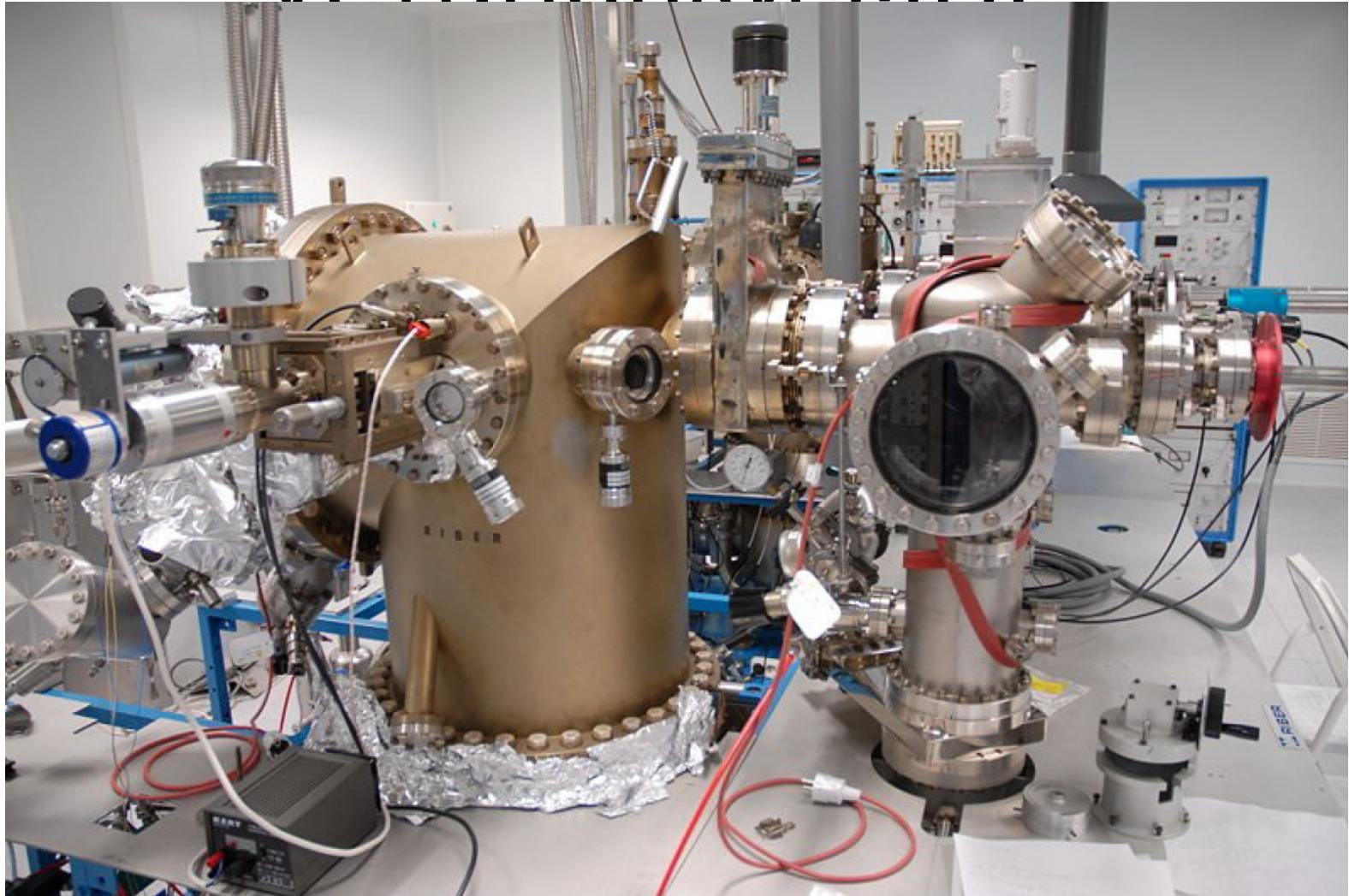
Промислова реалізація двох парадигм



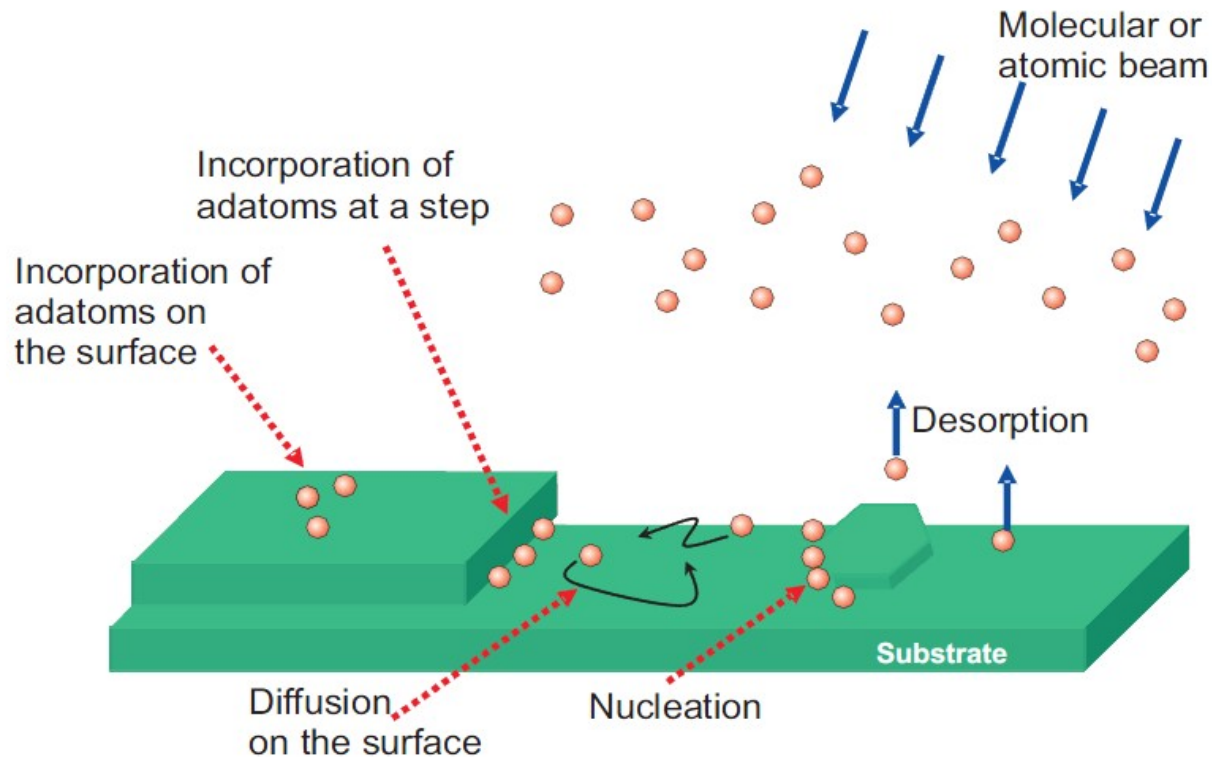
Молекулярно-променева епітаксія



Загальний вигляд установки МПФ

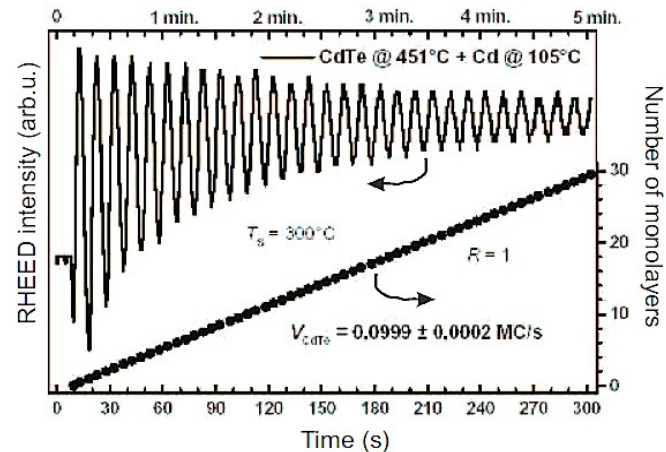
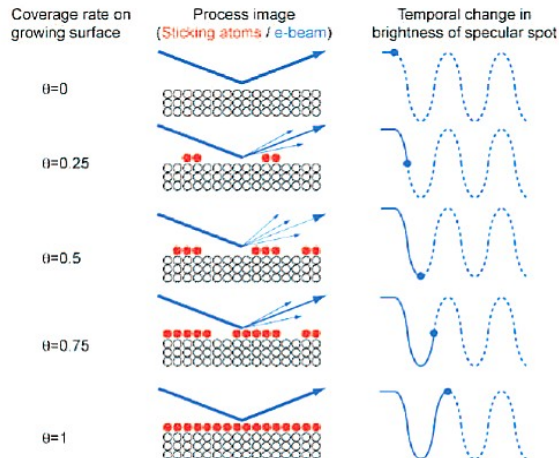
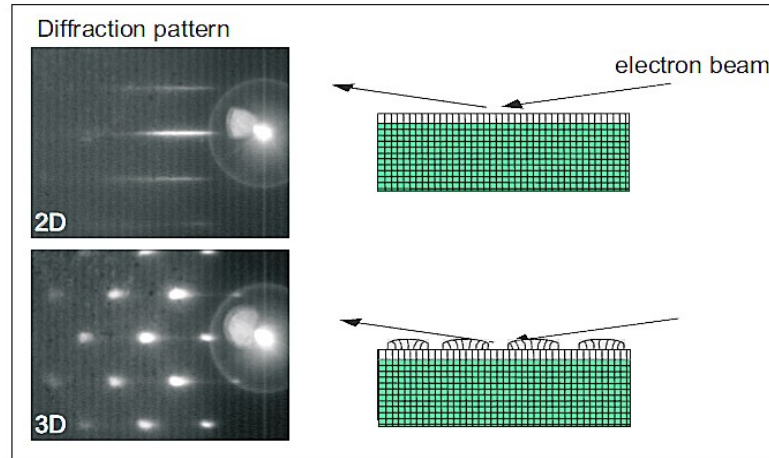


Процеси, що відбуваються на поверхні під час росту

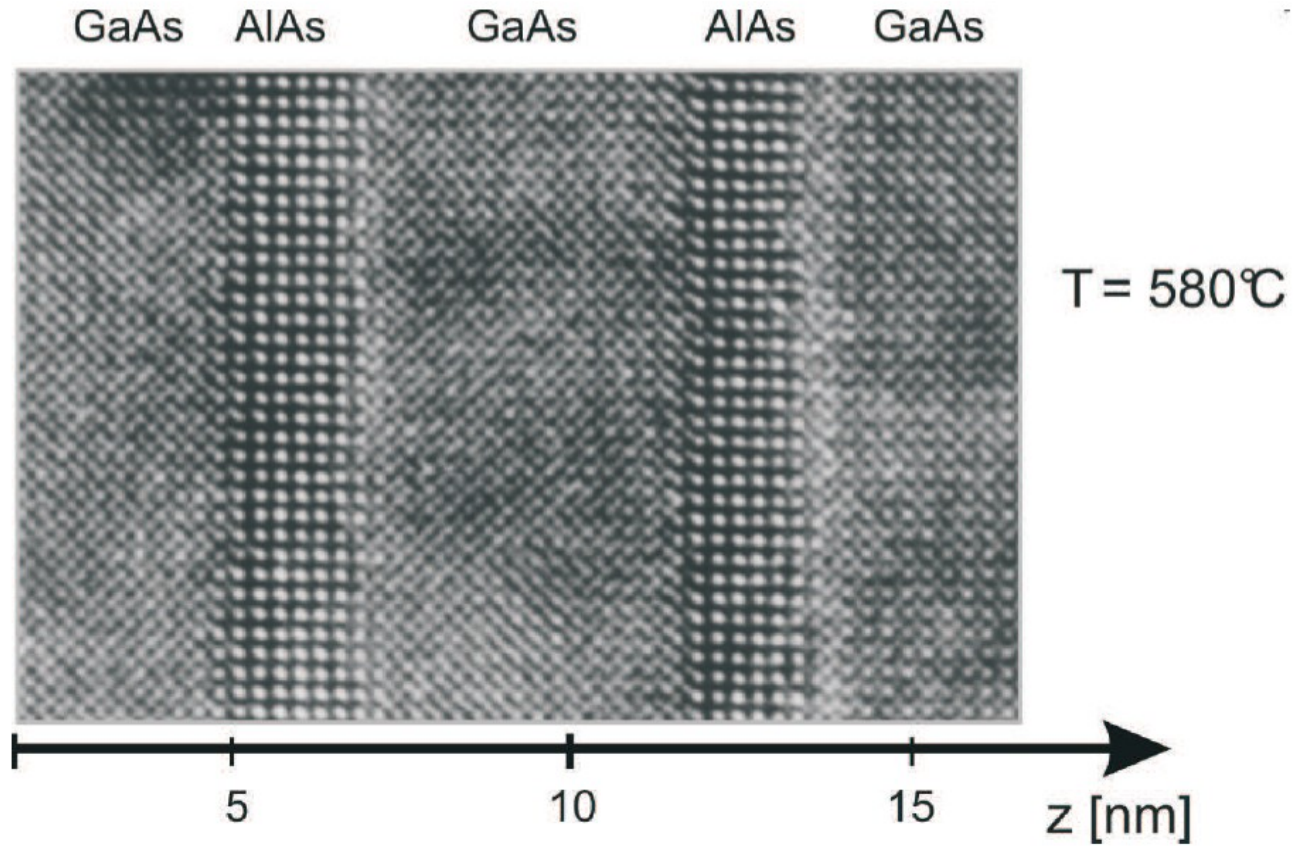


Adjustable growth parameters:
- substrate temperature
- molecular flux

Метод ДШЕ для контролю якості шарів



Приклад створення надгратки методом МВЕ



Молекулярно-пременеві методи

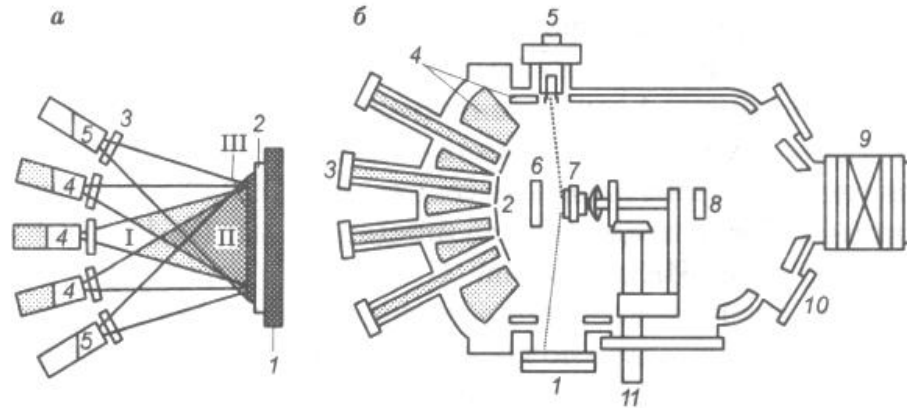


Рис. 8.1

Схема эпитаксиального наращивания (а)
и общая схема ростовой камеры (б)

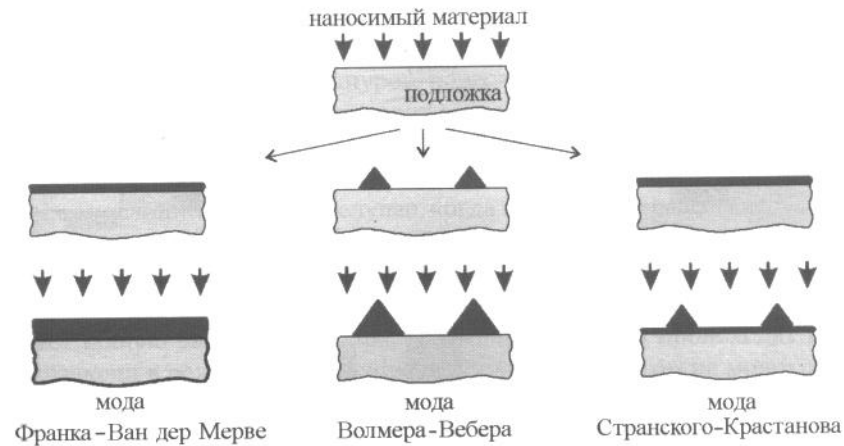
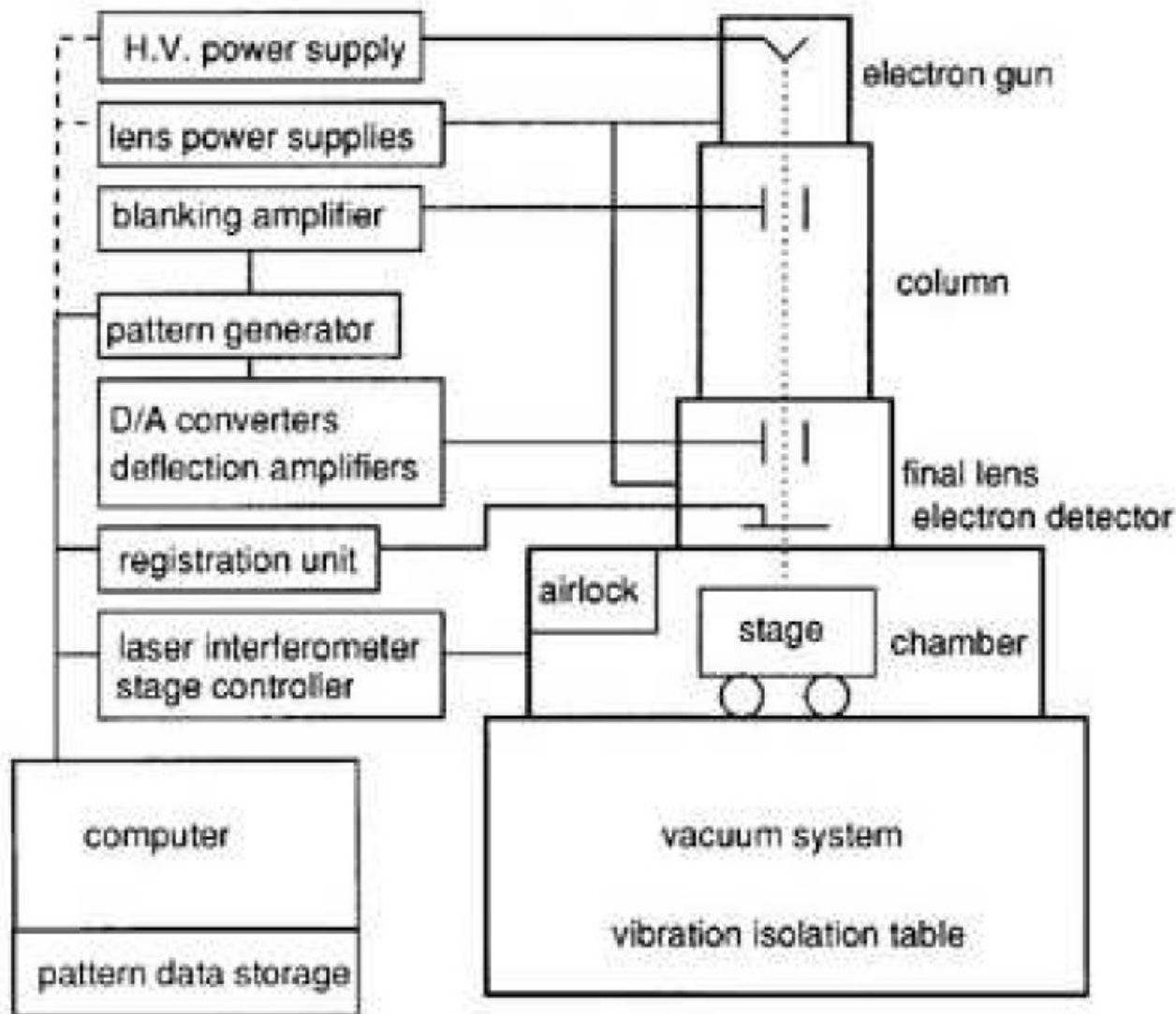
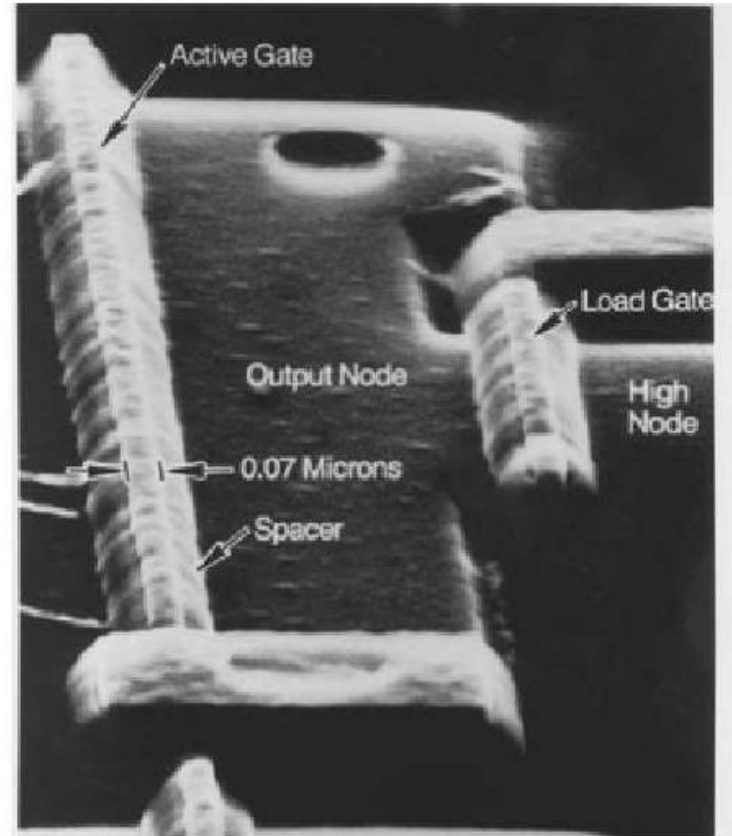
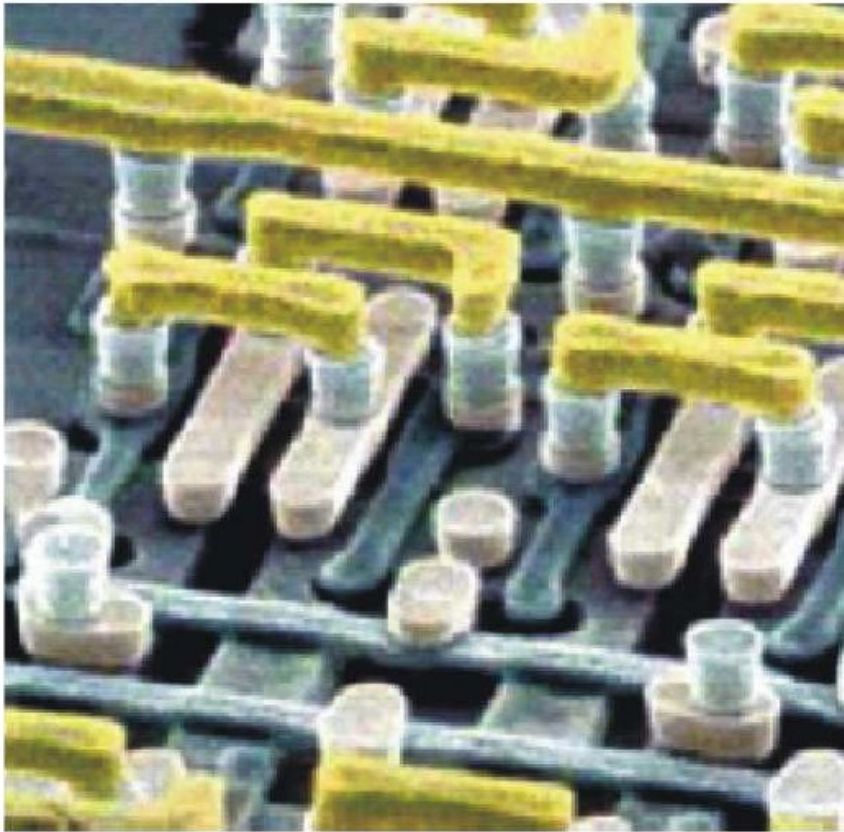


Рис. 2.17. Режимы роста тонких пленок

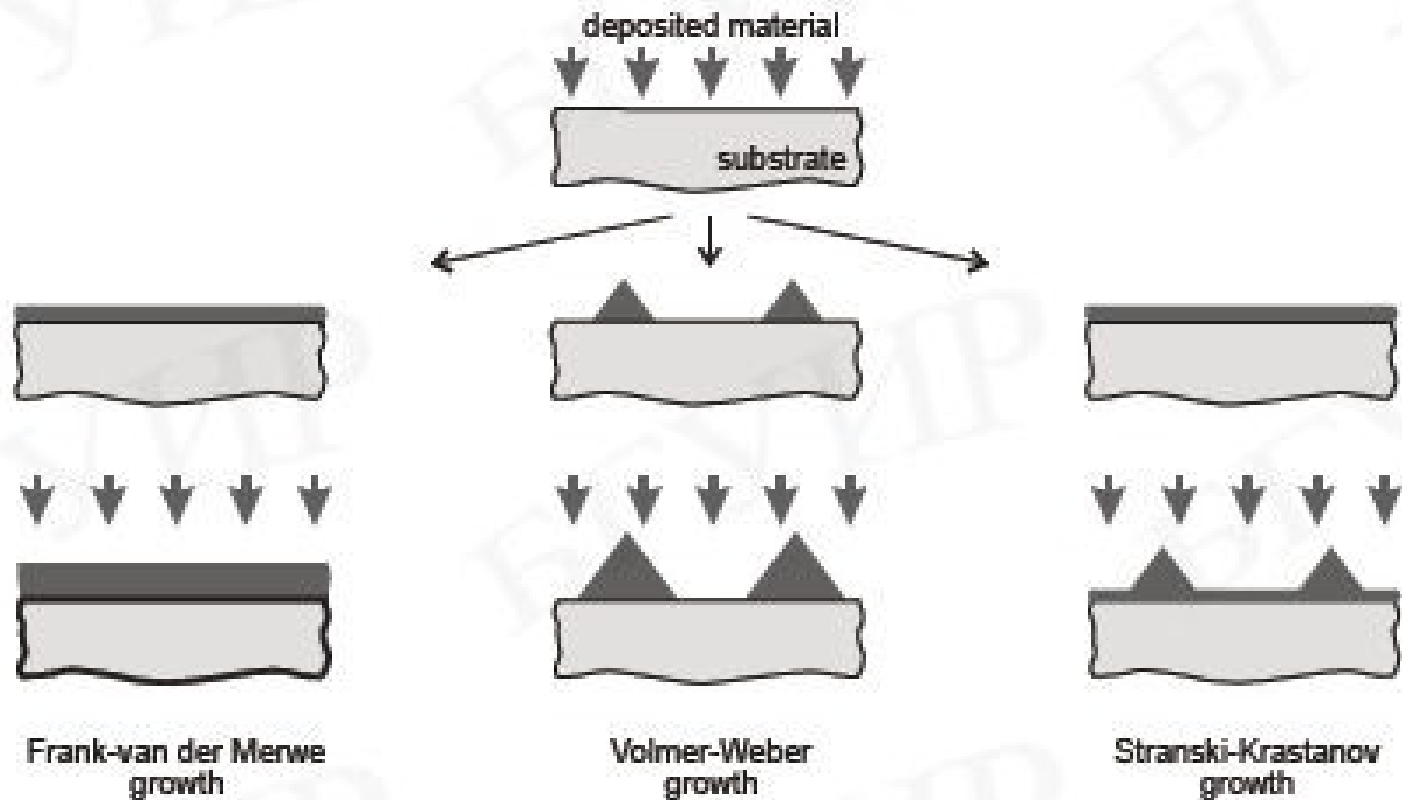
Електронно-променева літографія



Приклад структур, створених EBL



Самоорганізація



Нанодрук

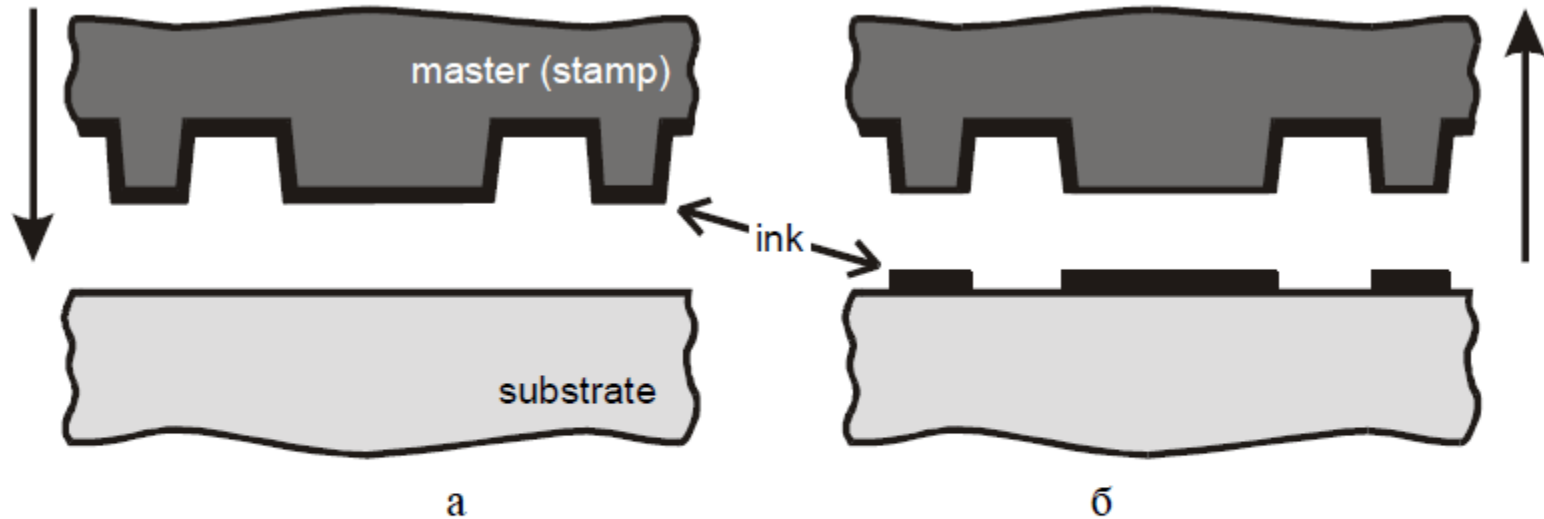
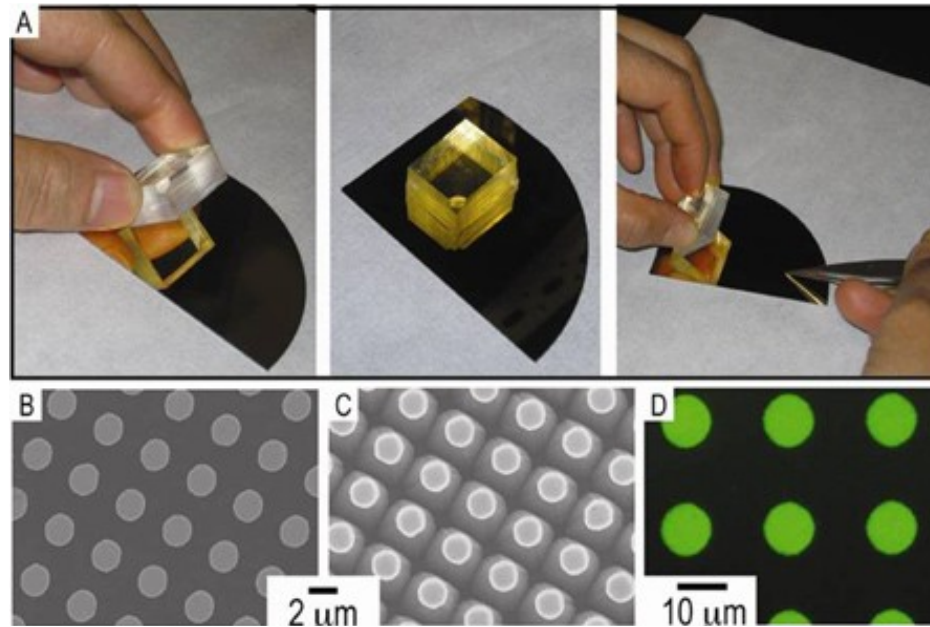


Рис. 3.11. Чернильная печать

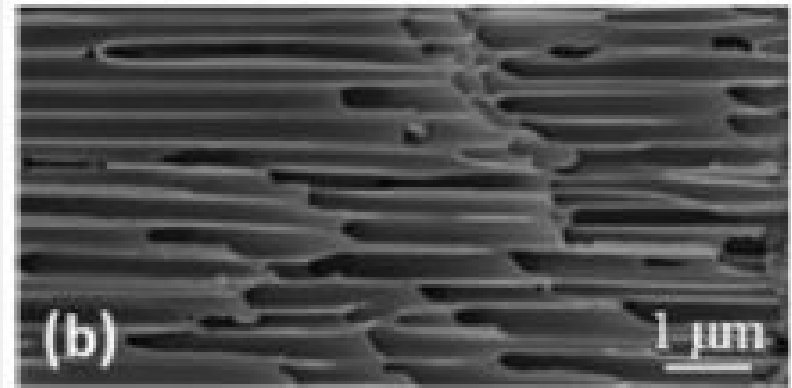
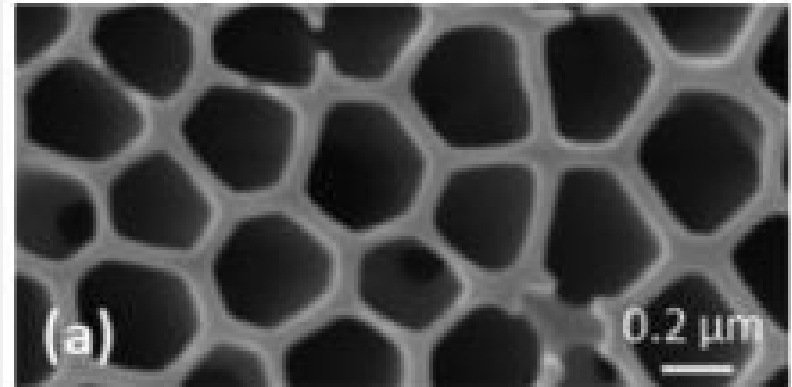
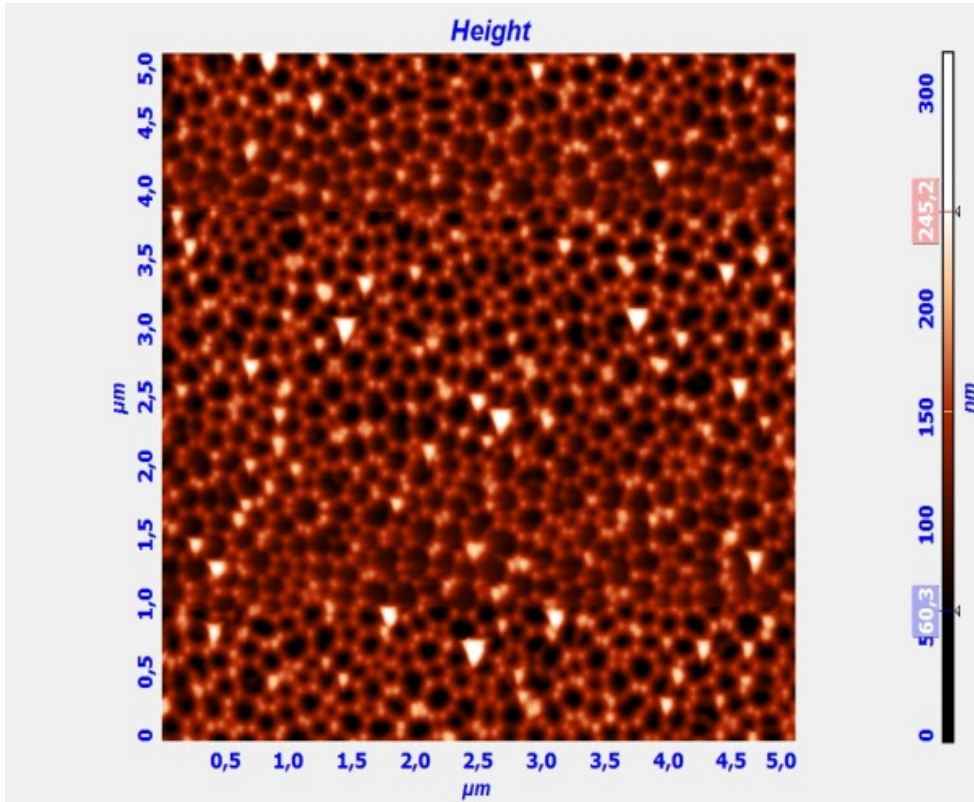
а – штамп, покрытый чернилами из мономера, и подложка перед печатью;
б – рисунок пленки, оставшейся на поверхности подложки после удаления штампа

Приклади структур, створених по технології нанодруку



(A) Photographs of three major steps involved in μ CP. (B) An SEM image of silver disks fabricated by μ CP of SAM followed by selective etching of silver film. (C) An SEM image of structures fabricated by using silver (B) as resist layer for underneath Si(100) etching. (D) Fluorescence optical micrograph of an array of IgG dots fabricated by μ CP.

Поруватий оксид алюмінія (Al_2O_3)



Образование анодных оксидов из тонких пленок или массивного алюминия в жидких электролитах при электрохимическом анодном окислении (оксидировании) происходит в результате встречной миграции ионов Al^{3+} и O^{2-} в электрическом поле большой напряженности.

Застосування пористих плівок Al_2O_3

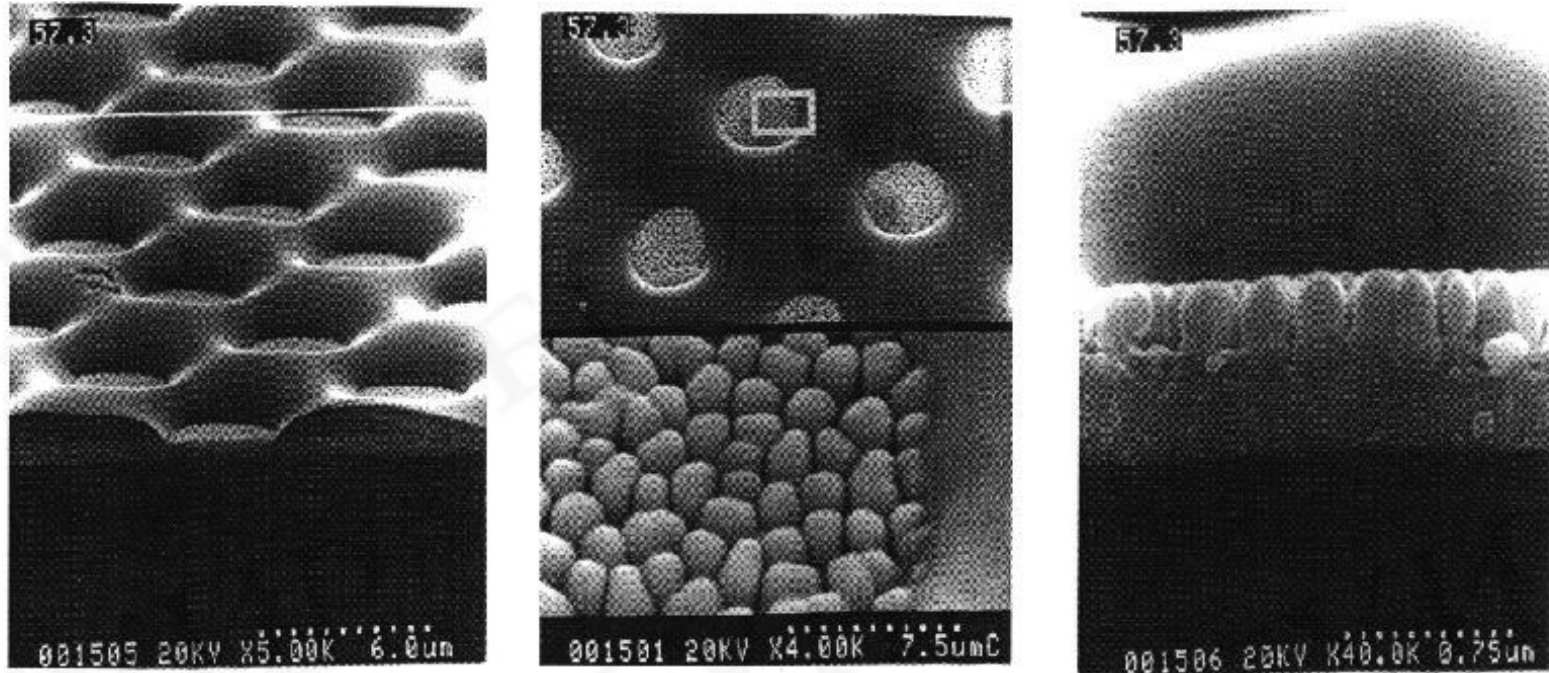


Рис. 5.8. РЭМ-фотографии столбиковых микроструктур, локально сформированных в отверстиях фоторезистивной маски через пористый оксид алюминия [8]

Поруватий кремній та його морфологія

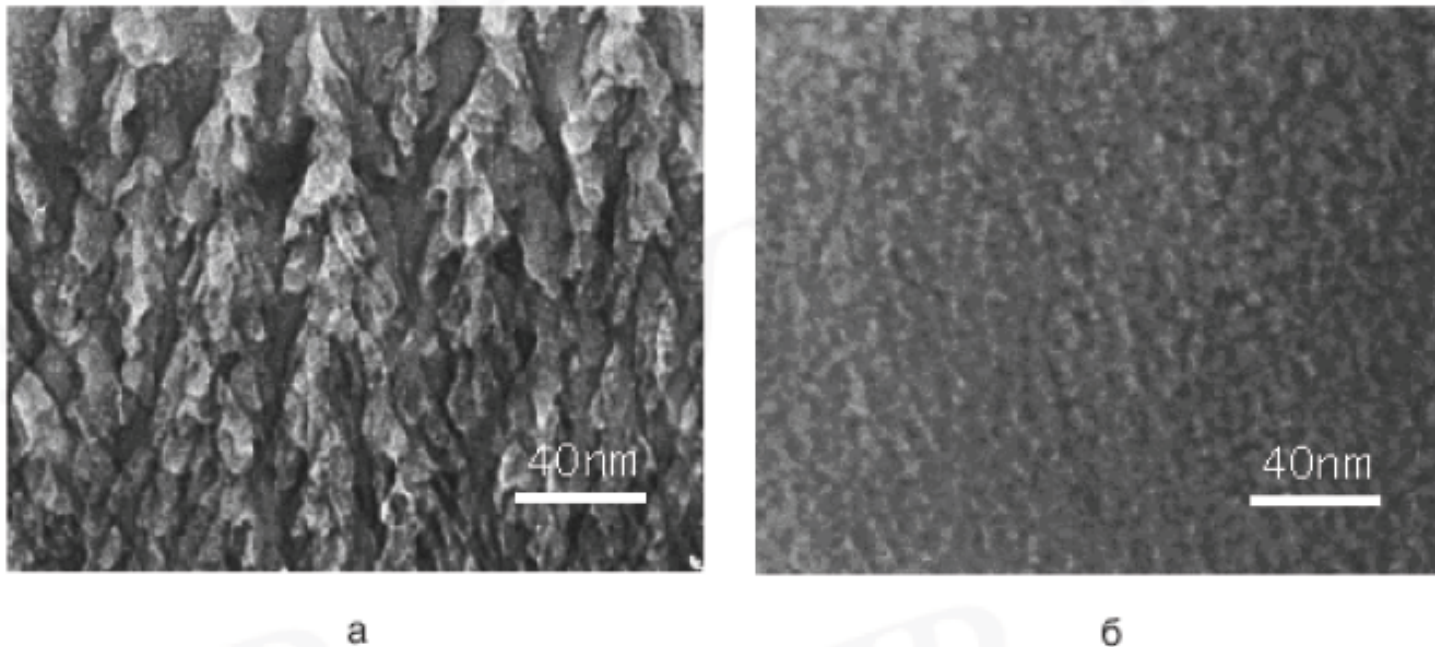


Рис. 5.2. Типичная морфология слоев пористого кремния:

а – монокристалл, анодированный в водном растворе плавиковой кислоты;

б – монокристалл, анодированный в концентрированной плавиковой кислоте (фотографии любезно предоставлены авторам доктором С. К. Лазаруком из своей личной коллекции)

Цеоліти

Термин "цеолит" (в переводе с греческого — кипящий камень) был предложен Ф. Кронштедтом, который в 1756 году обнаружил, что минерал стильбита (семейство гидратированных силикатов алюминия) при нагревании вспучивается, т.е. увеличивается в объеме с выделением воды. Подразделяют содалиты, мордениты, фожазиты, шобазиты, пентасилы и т.д.

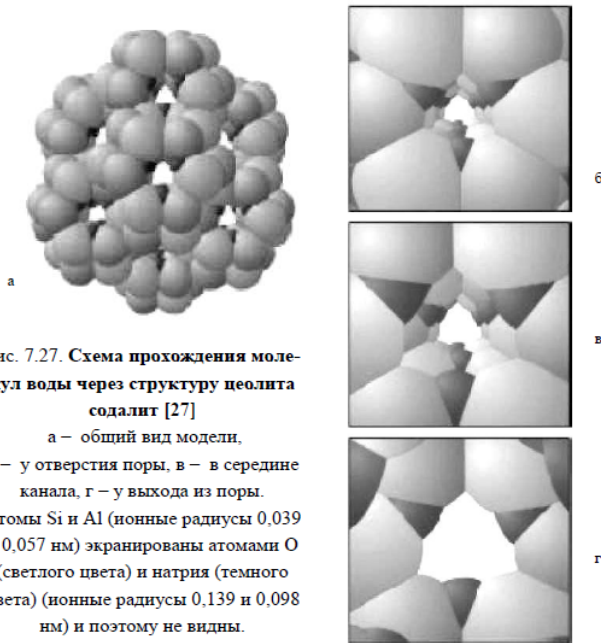


Рис. 7.27. Схема прохождения молекул воды через структуру цеолита содалит [27]

а – общий вид модели,

б – у отверстия поры, в – в середине канала, г – у выхода из поры.

Атомы Si и Al (ионные радиусы 0,039 и 0,057 нм) экранированы атомами O (светлого цвета) и натрия (темного цвета) (ионные радиусы 0,139 и 0,098 нм) и поэтому не видны.

Размеры пор могут быть несколько различными в пределах одного структурного типа цеолитов, поскольку они зависят от соотношения кремния к алюминию – Si/Al, типа катионов, адсорбции различных молекул, прежде всего, воды. Например, для цеолитов КА диаметр кольца равен 0,3 нм, NaA – 0,42 нм, СаА – 0,5 нм.

Соотношение Si/Al в составе кристаллической структуры

Структуры цеолитів

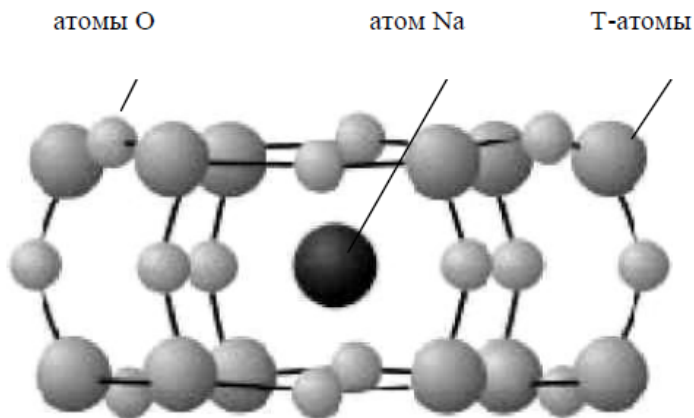


Рис. 7.28. Вторичная структура единица
фожазита – гексагональная призма [27]

Размеры атомов условны

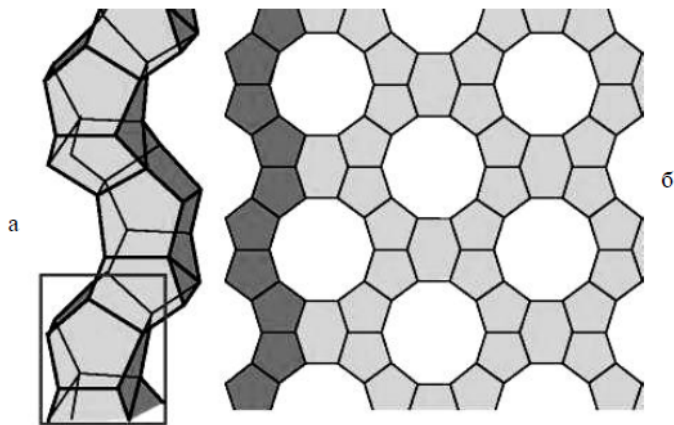


Рис. 7.29. Структура цеолита типа пентасила [27]

а – цепочка, б – слой

Основной структурный элемент выделен рамкой

Основным структурным элементом цеолитов указанных типов является почти правильный тетраэдр, в котором угол связи O–T–O (где T – атомы Al и Si) немного ($\pm 2-3^\circ$) отличается от тетраэдрического ($109^\circ 28'$).

Соединение тетраэдров посредством атомов кислорода приводит к образованию различных вторичных структур: колец (из 4, 5, 6, 8, 10, 12 T-атомов), призм и более сложных многогранников.

Наноаэрогели



Аэрогели – это пористые твердотельные материалы, структура которых представляет жесткий каркас с большим объемом внутренних пор, который в десятки раз превышает объем, занятый каркасом, т.е. самим материалом. Известны аэрогели на основе Li_2O , B_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_3O_4 , Cu_2O , ZrO_2 . Аэрогели состоят из фрактальных агрегатов, которые образуются в процессе фрактального роста отдельных частиц.

В процессе образования аэрогелей фракталы по мере разрастания соприкасаются друг с другом и срастаются, формируя жесткий каркас. С ростом фрактальных агрегатов в объеме аэрогеля возникают дополнительные пустоты и уменьшается объем, занятый веществом. Наноаэрогели содержат каркасные прослойки нанометровой толщины. Среди аэрогелей большее распространение получил наноаэрогель SiO_2 .

На сьогодні все!
ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!