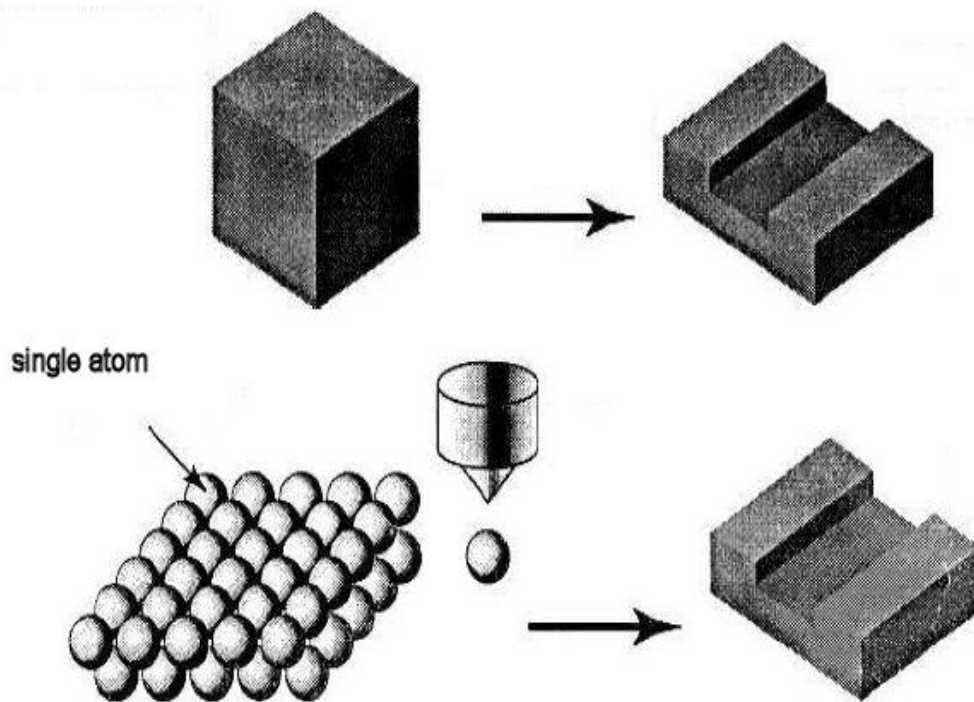


# **Створення нанооб'єктів**

# 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

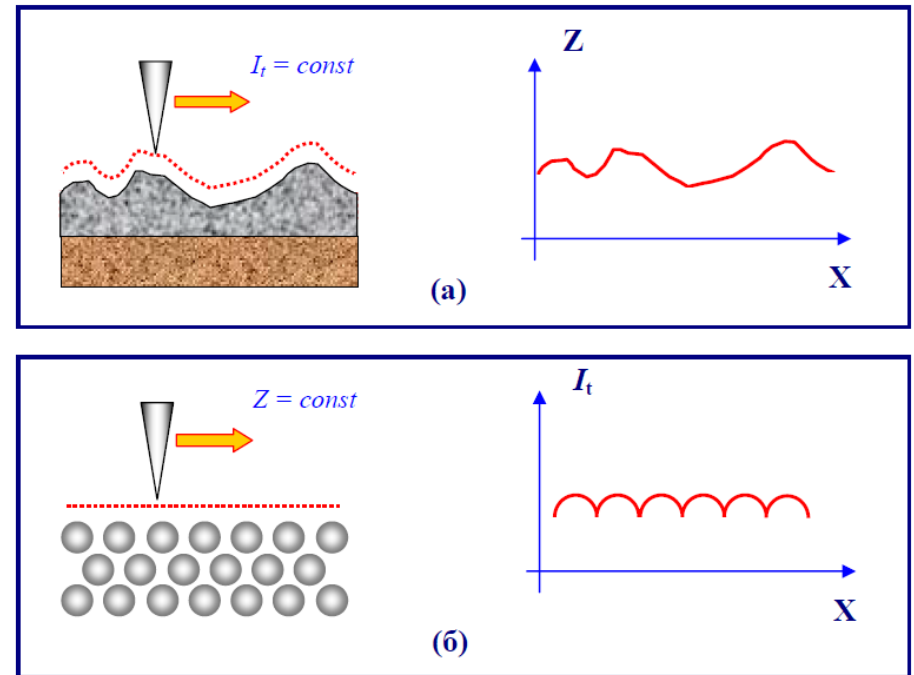
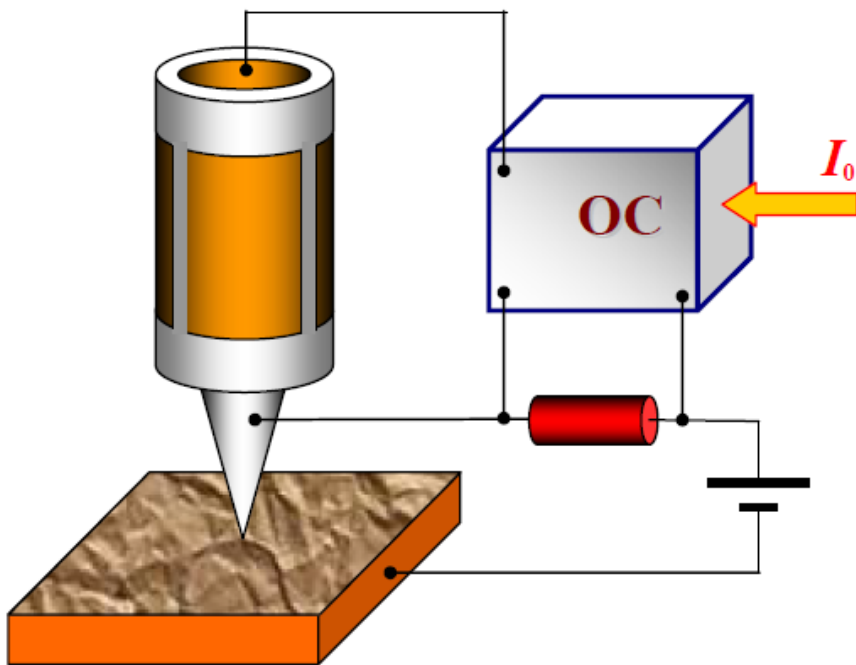


Рис. 43. Формирование СТМ изображений поверхности по методу постоянного туннельного тока (а) и постоянного среднего расстояния (б)

# Силовий зондовый мікроскоп

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

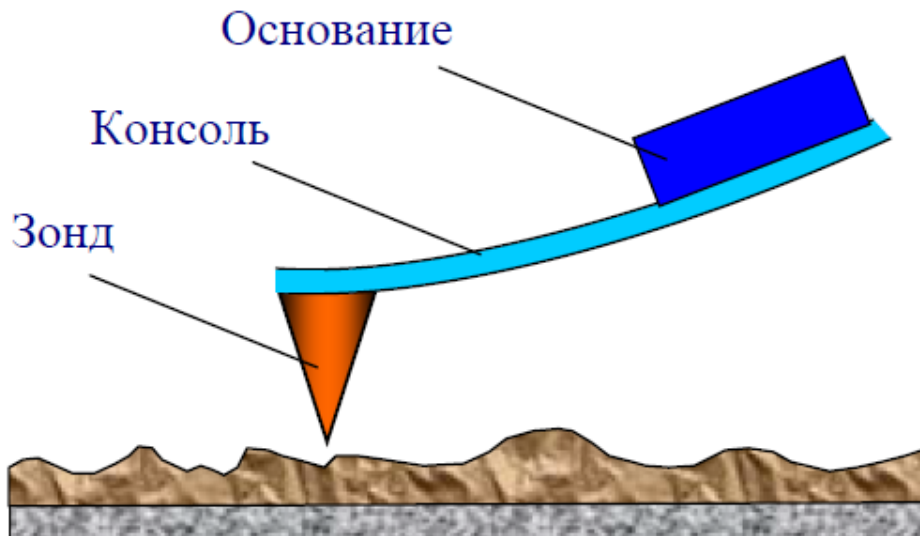


Рис. 60. Схематическое изображение зондового датчика АСМ

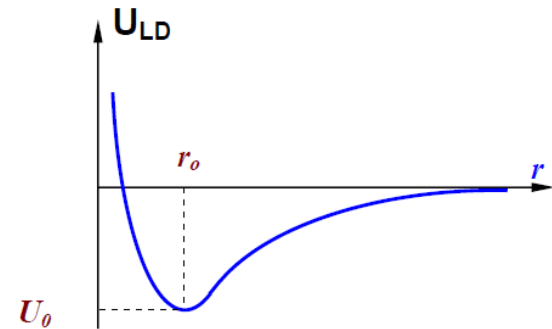


Рис. 61. Качественный вид потенциала Леннарда – Джонса

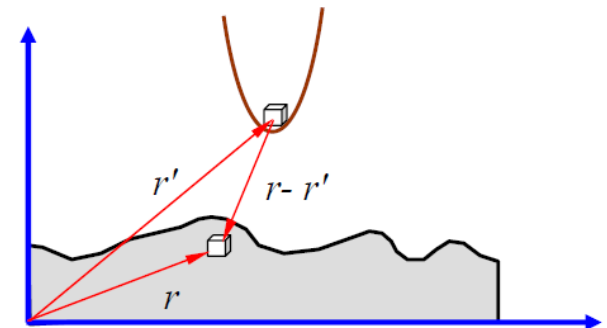
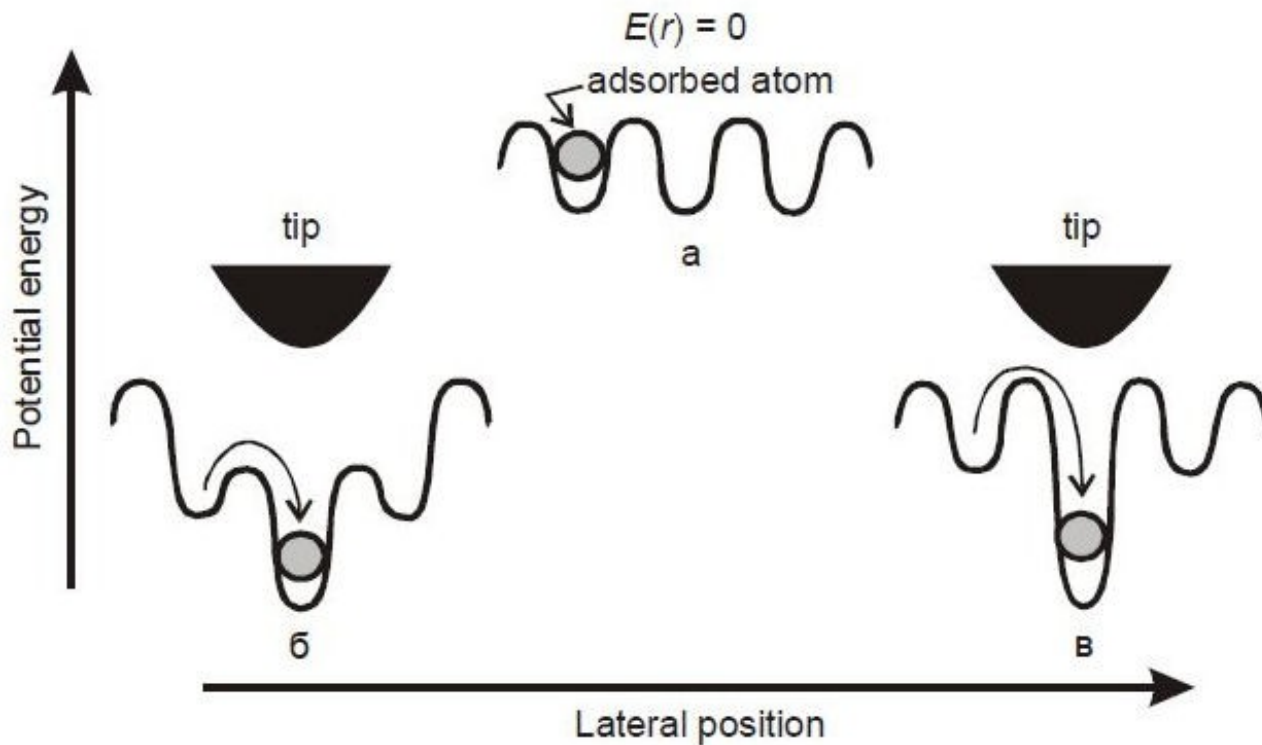


Рис. 62. К расчету энергии взаимодействия зонда и образца

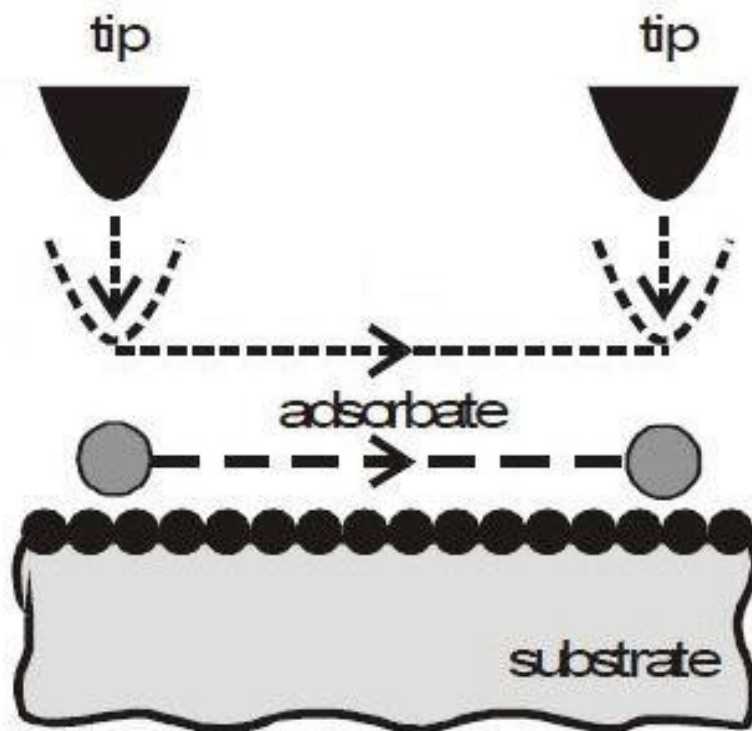
# Атомна інженерія: два підходи

Безконтактний метод

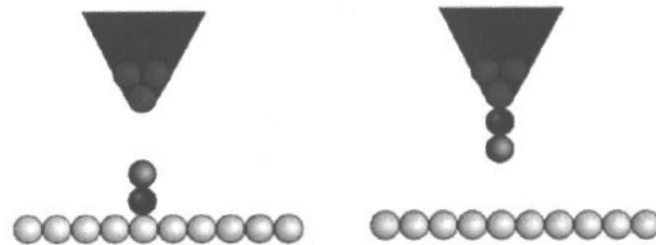


# Ковзання атому по поверхні

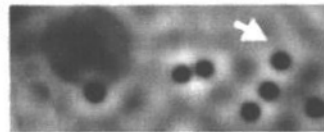
Контактний метод



# Приклад структури створеної зондовим методом



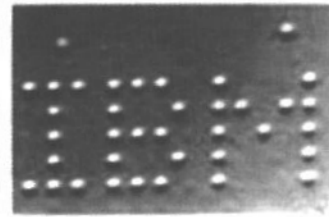
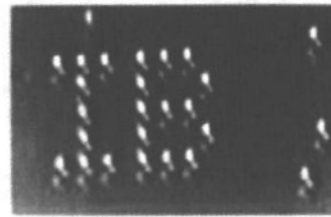
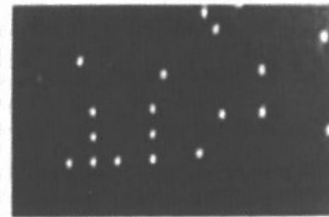
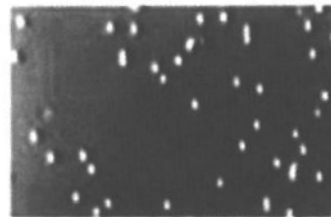
*a*



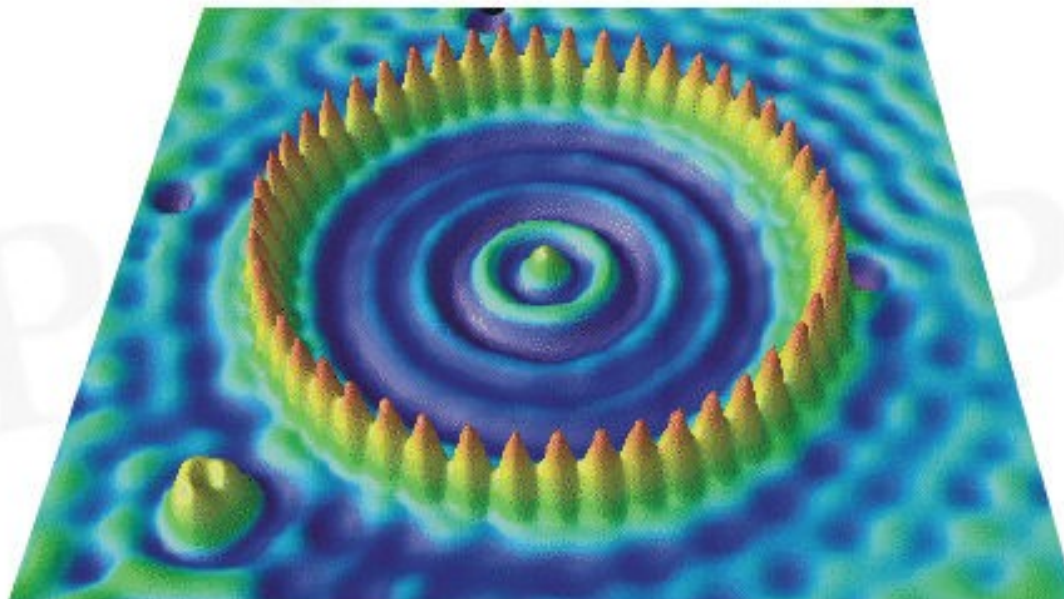
*б*



*в*

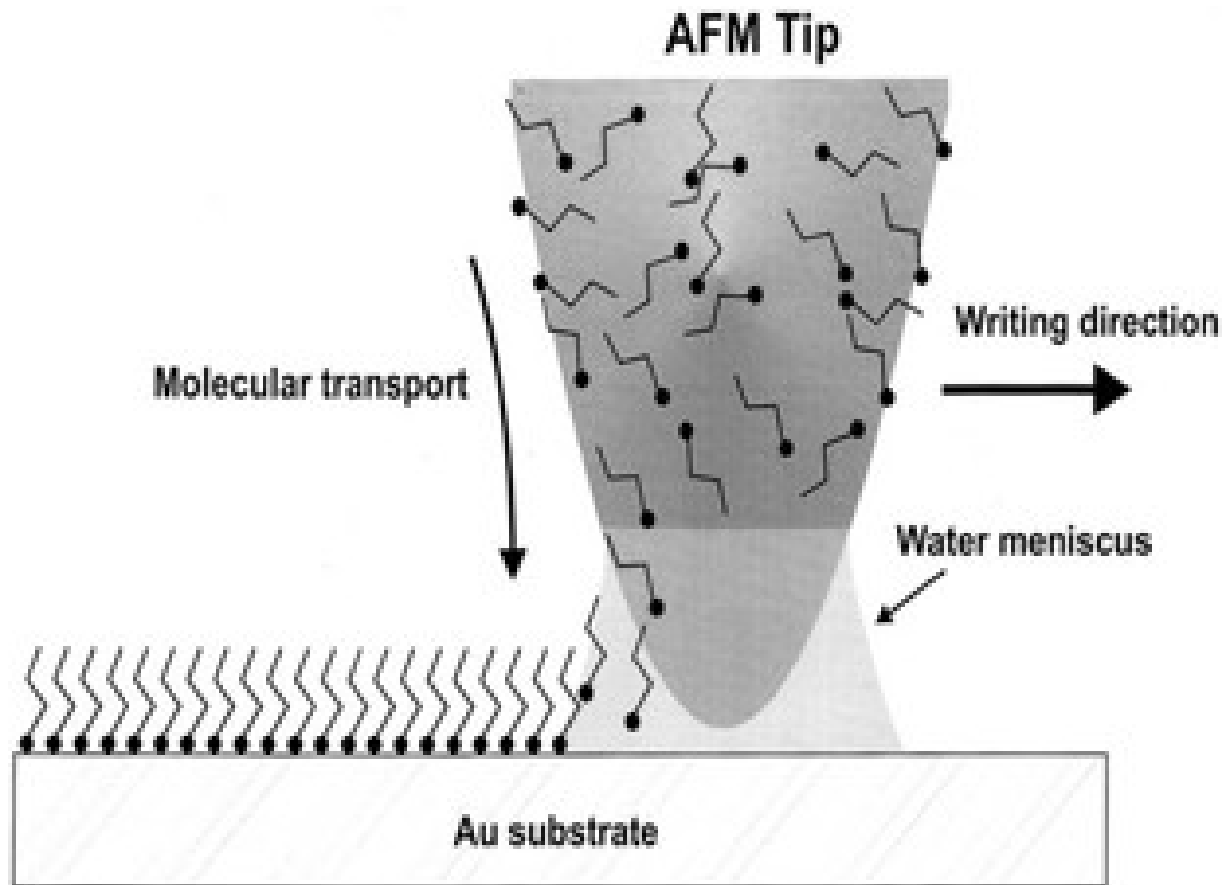


# Зразок штучного коралу



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

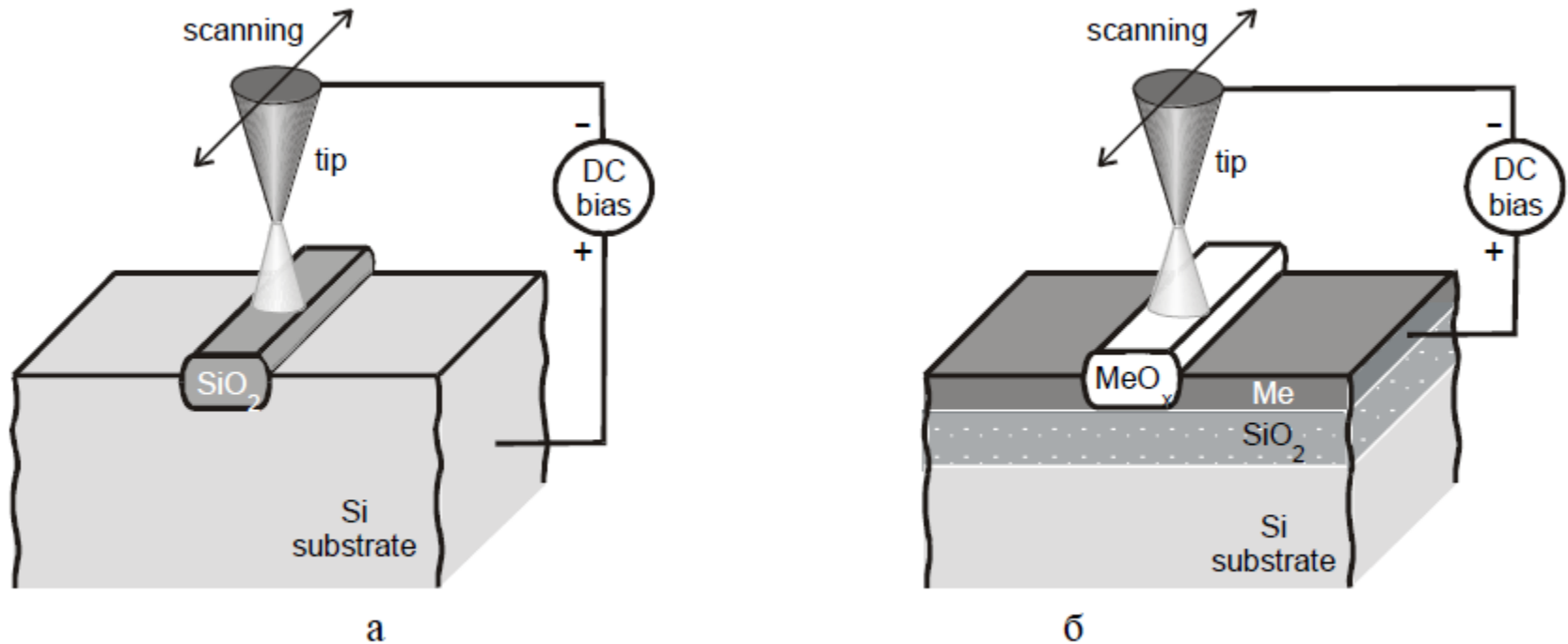
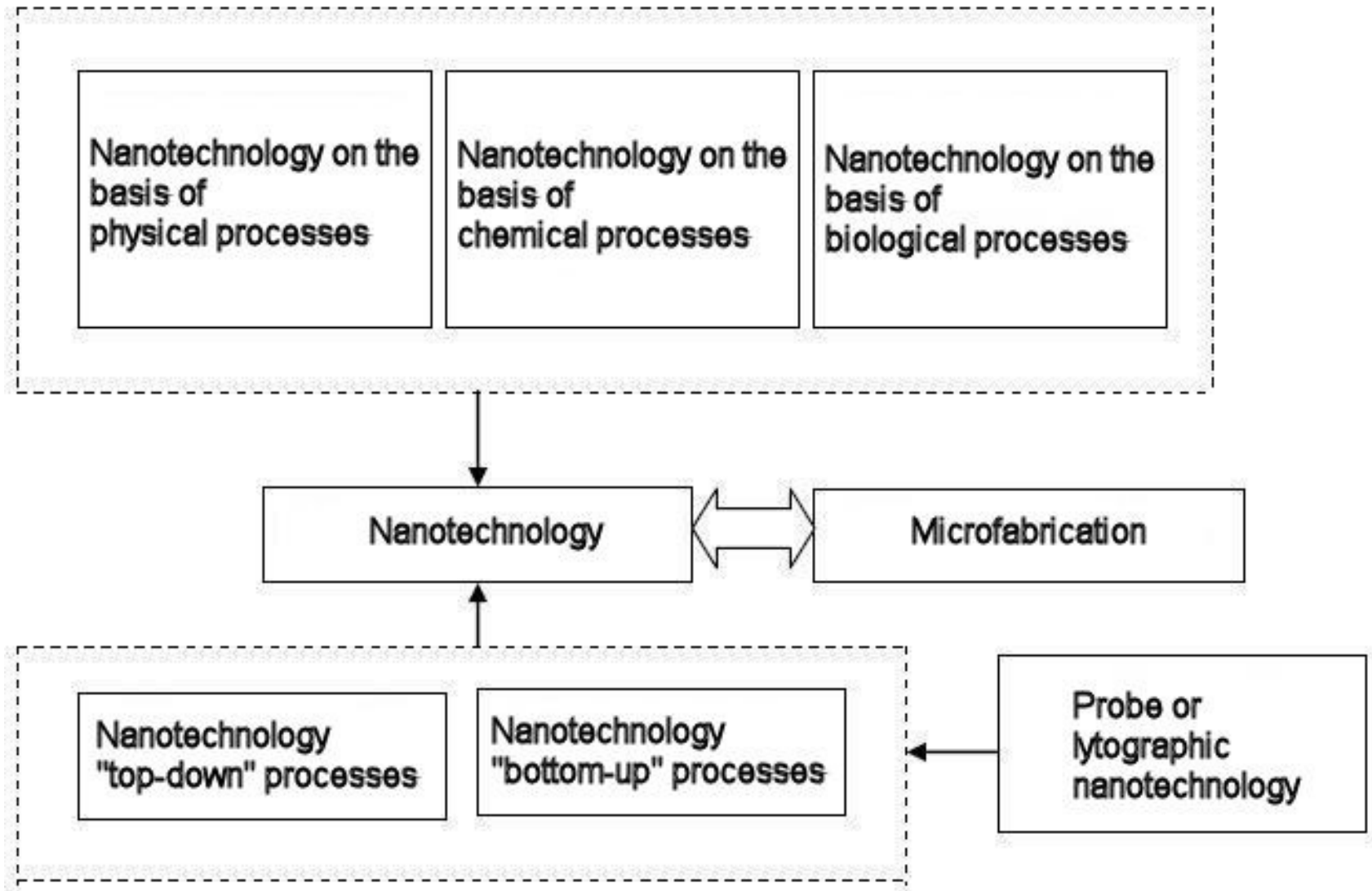
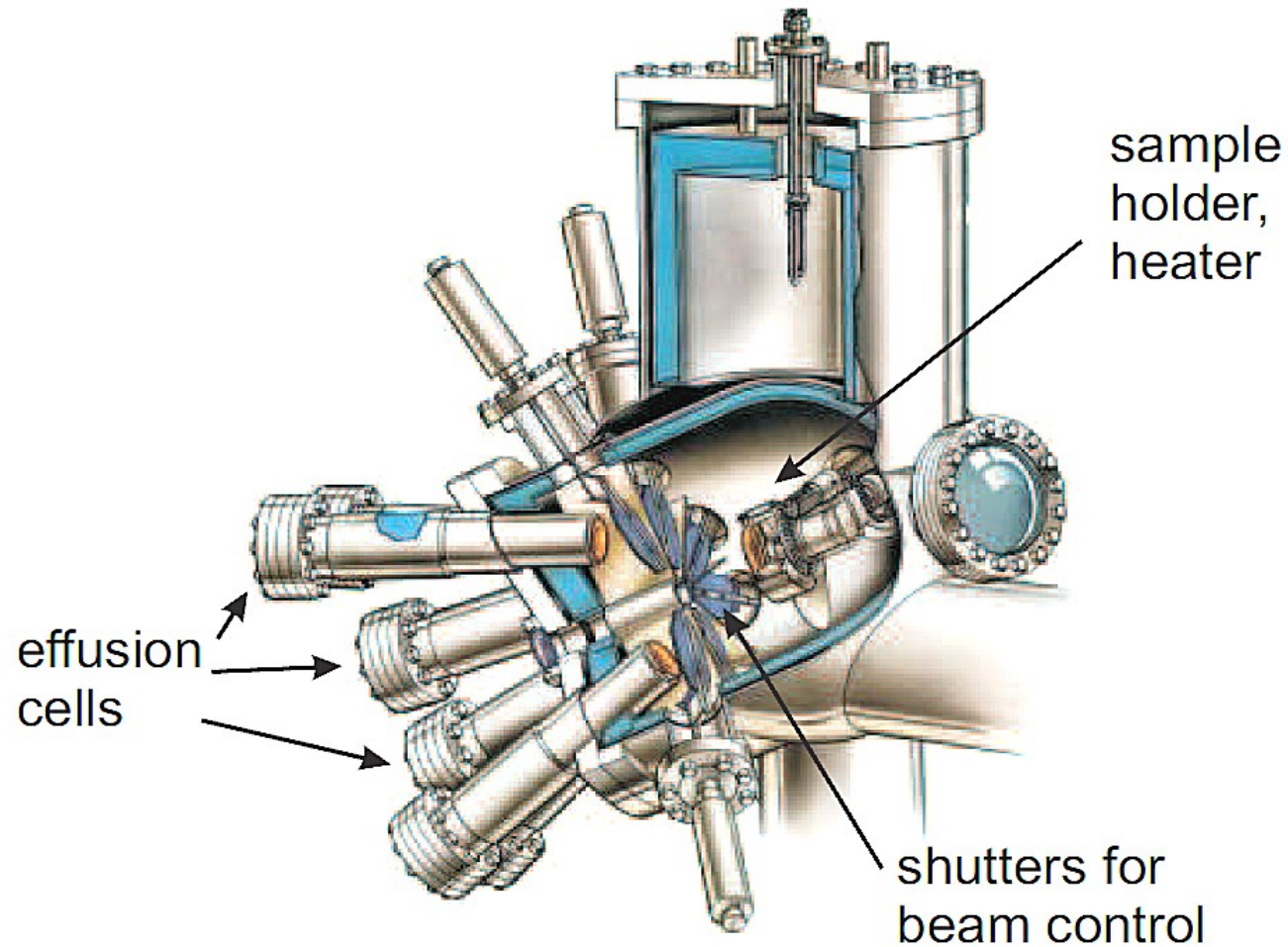


Рис. 3.8. Локальное зондовое окисление кремния (а) и пленки металла (б) [2]

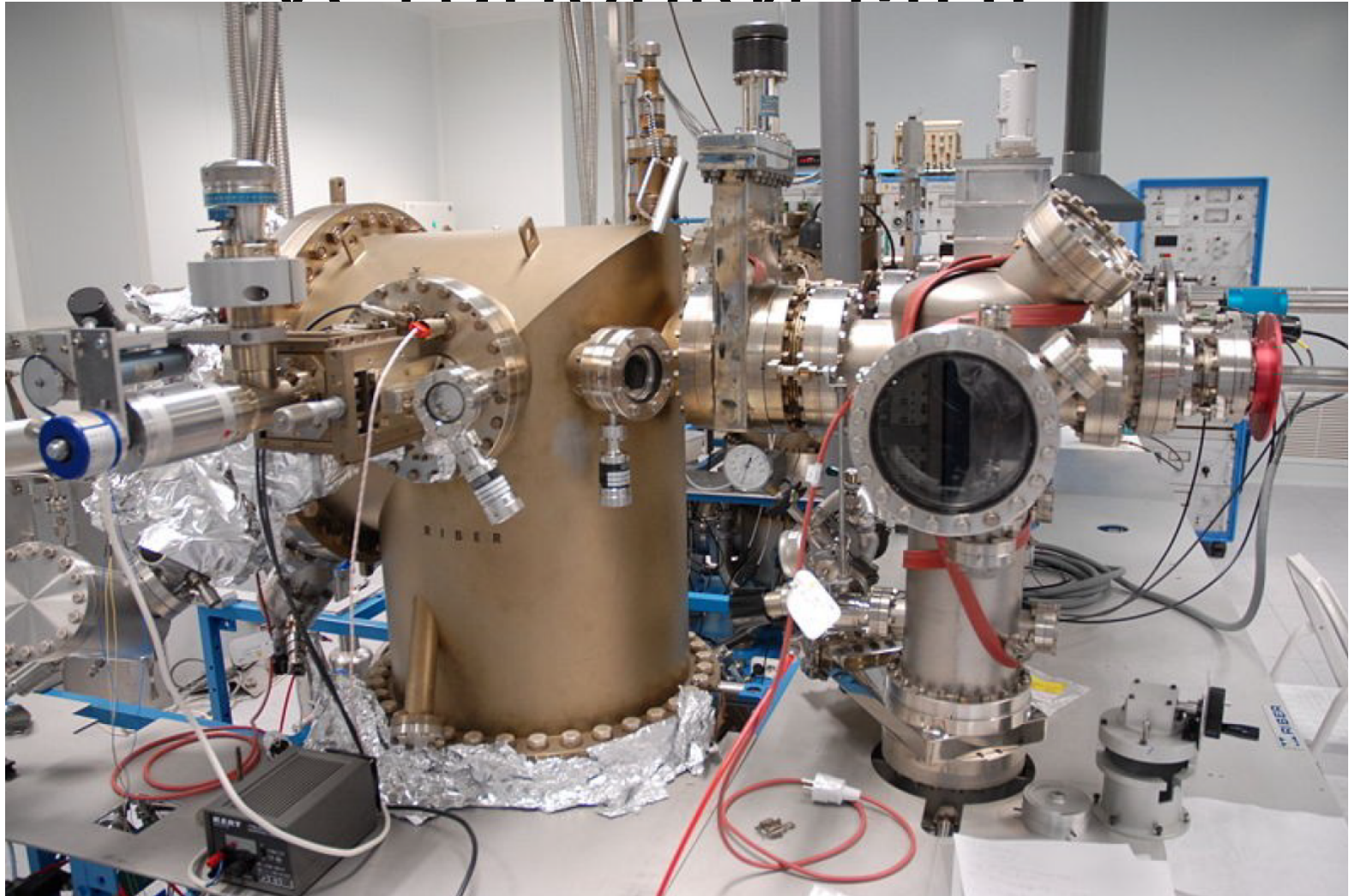
# Промислова реалізація двох парадигм



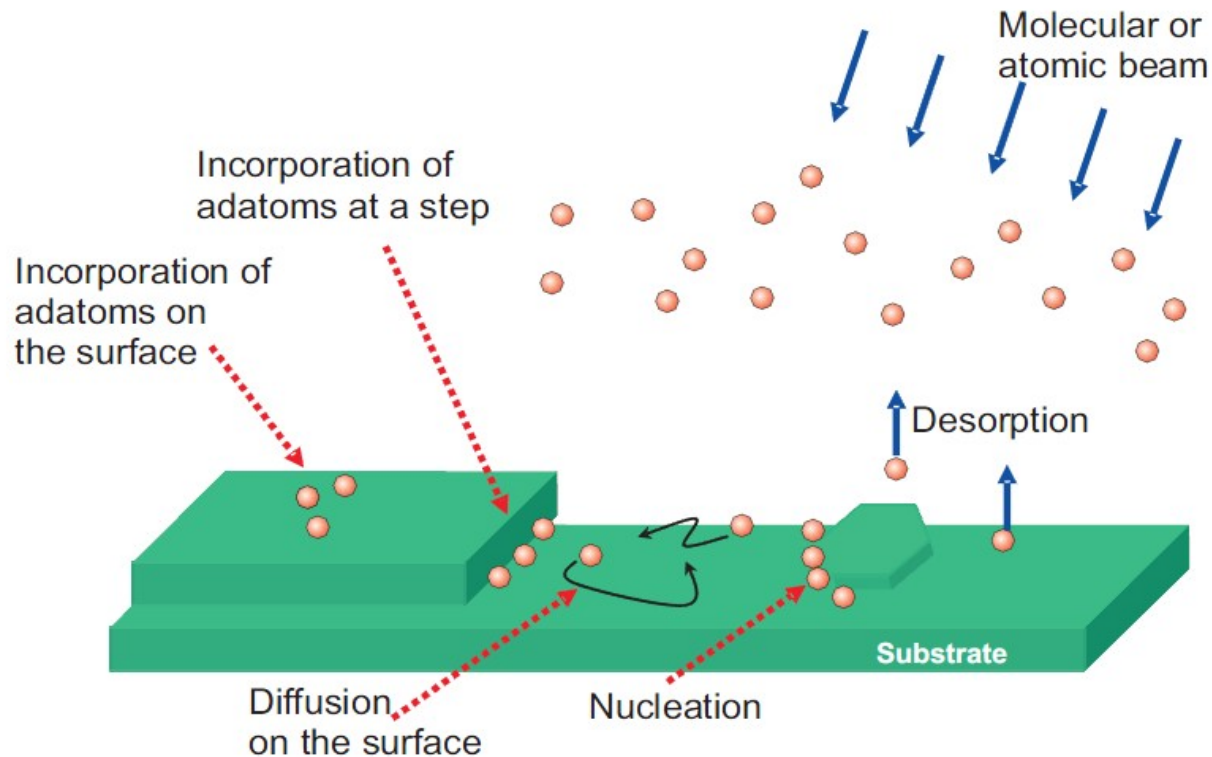
# Молекулярно-променева епітаксія



# Загальний вигляд установки МПФ



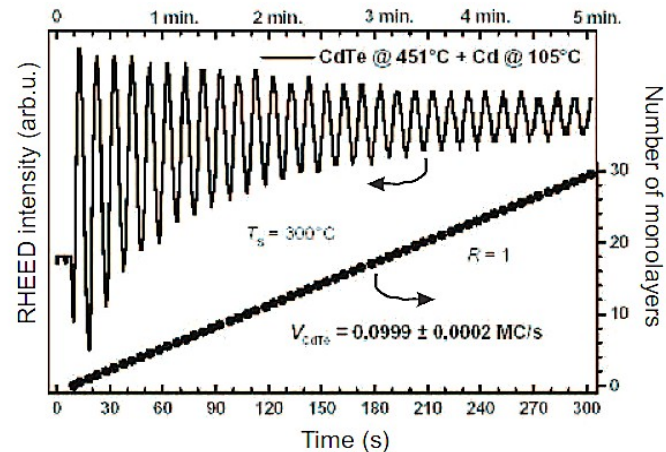
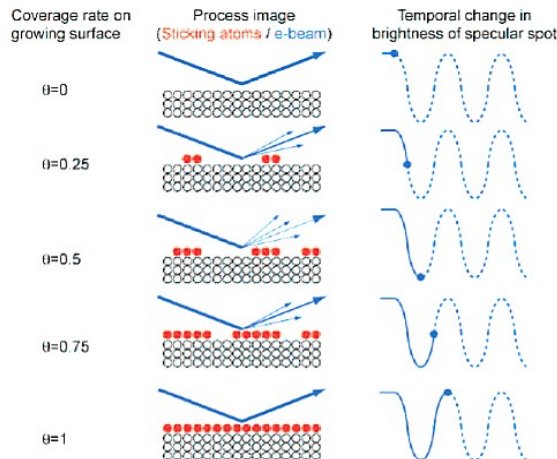
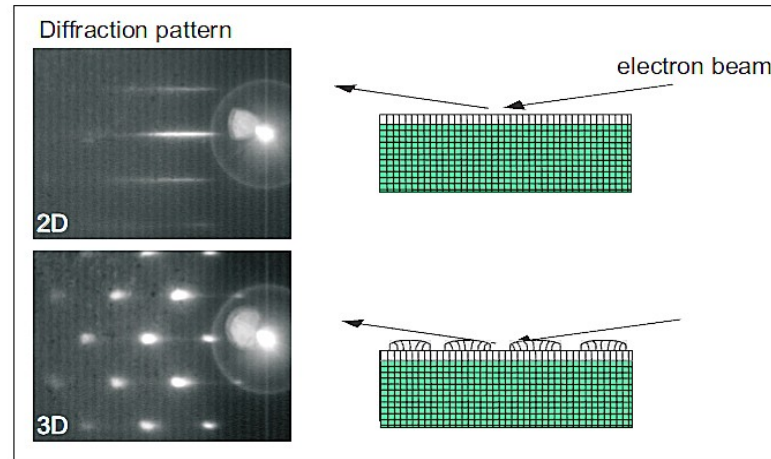
# Процеси, що відбуваються на поверхні під час росту



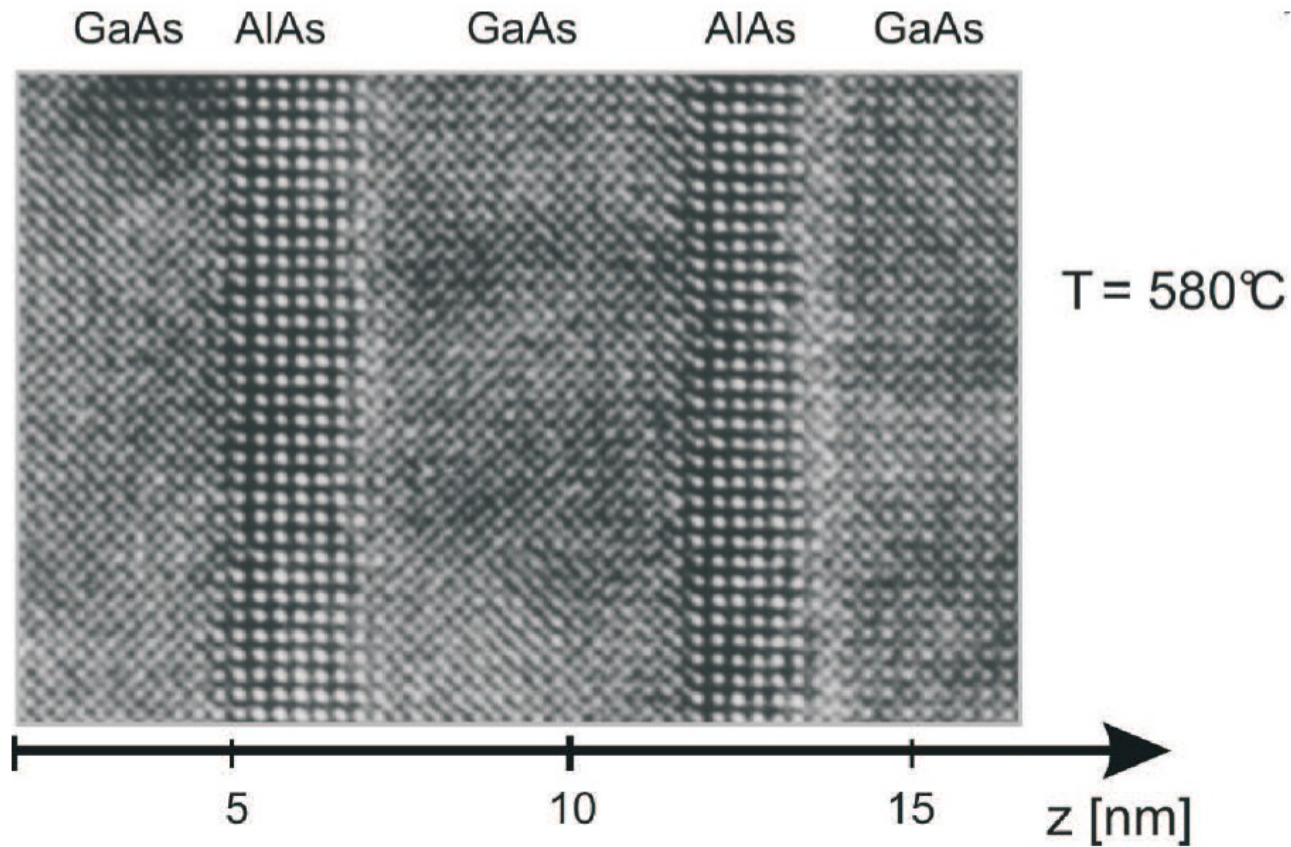
Adjustable growth parameters:

- substrate temperature
- molecular flux

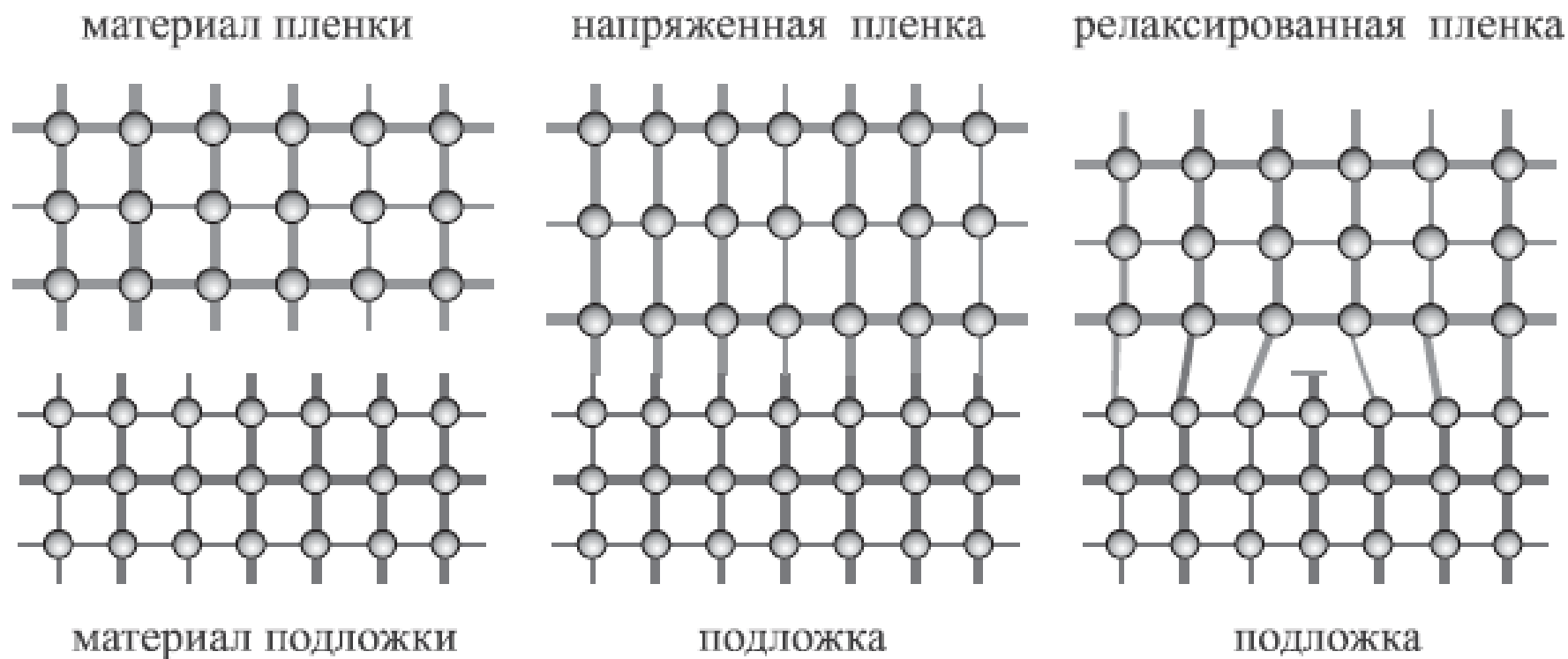
# Метод ДШЕ для контролю якості шарів



# Приклад створення надгратки методом МВЕ

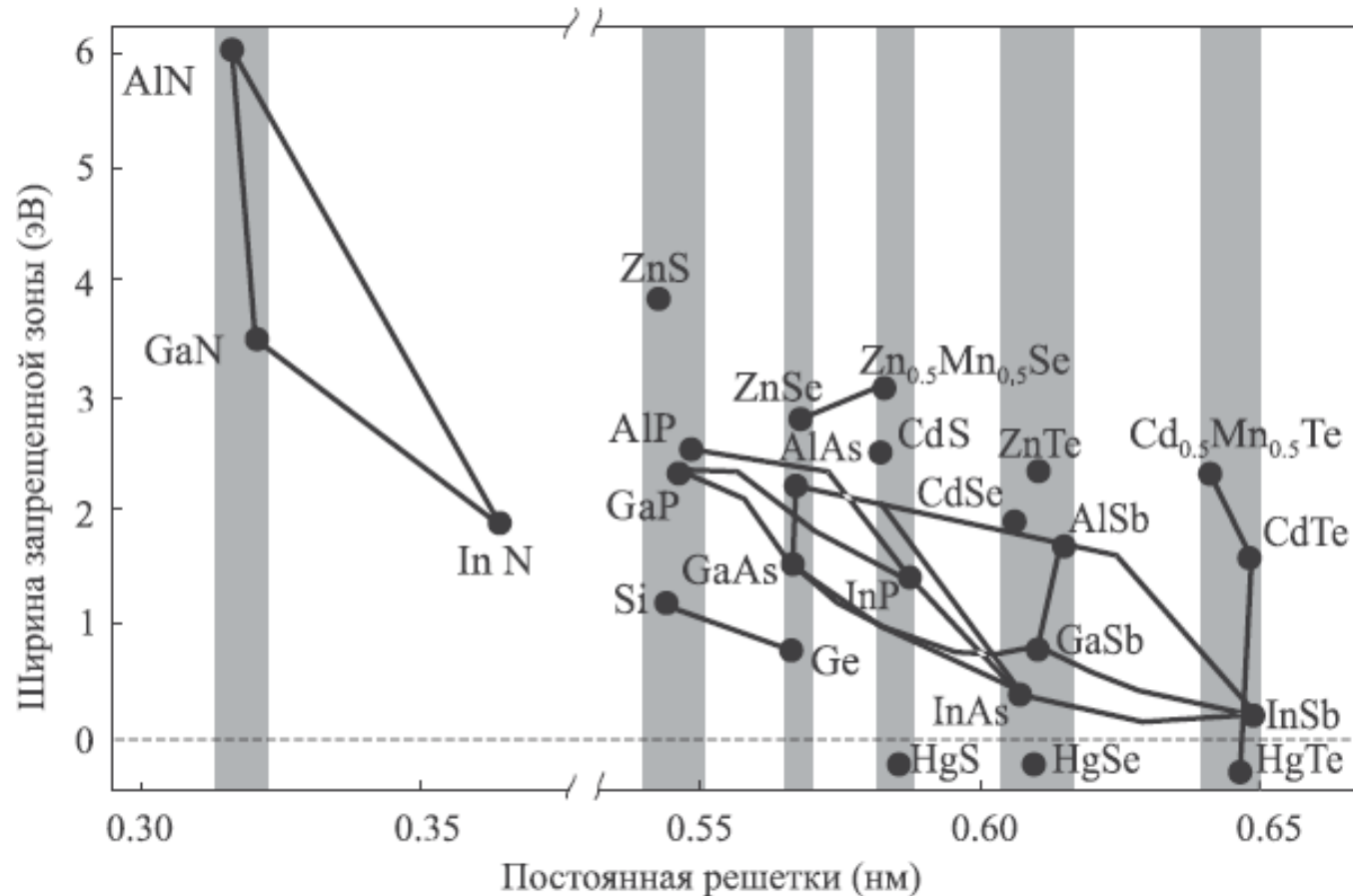


# Напружені ґратки



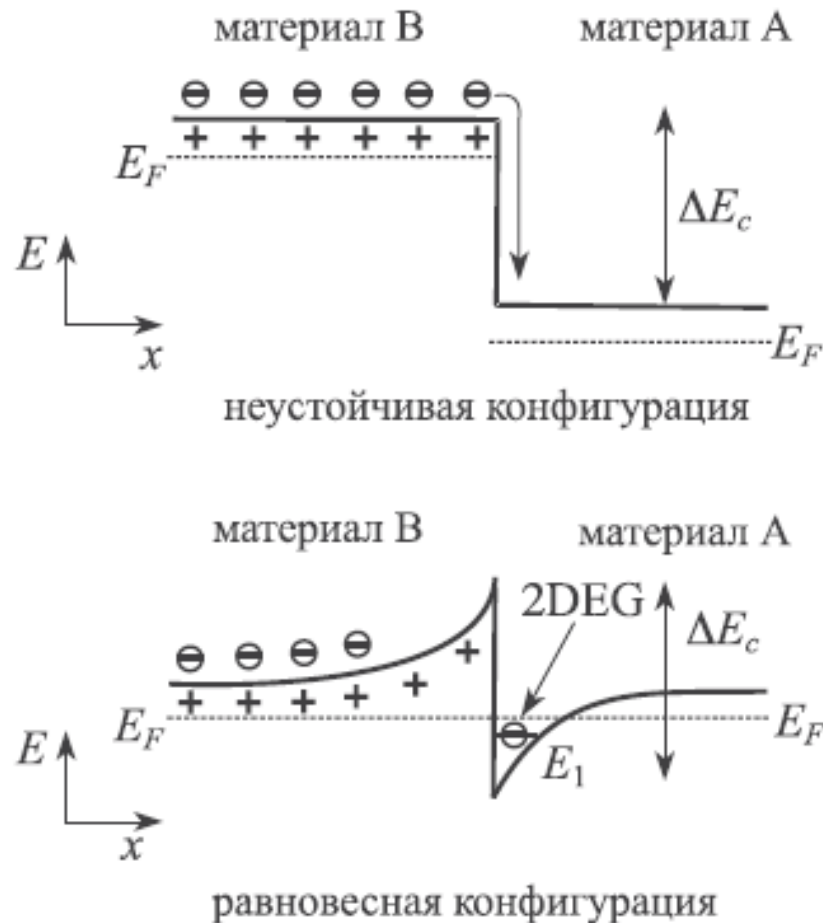
**Рис. 1.8.** Образование напряженной и релаксированной эпитаксиальной пленки

# Параметры зонной структуры



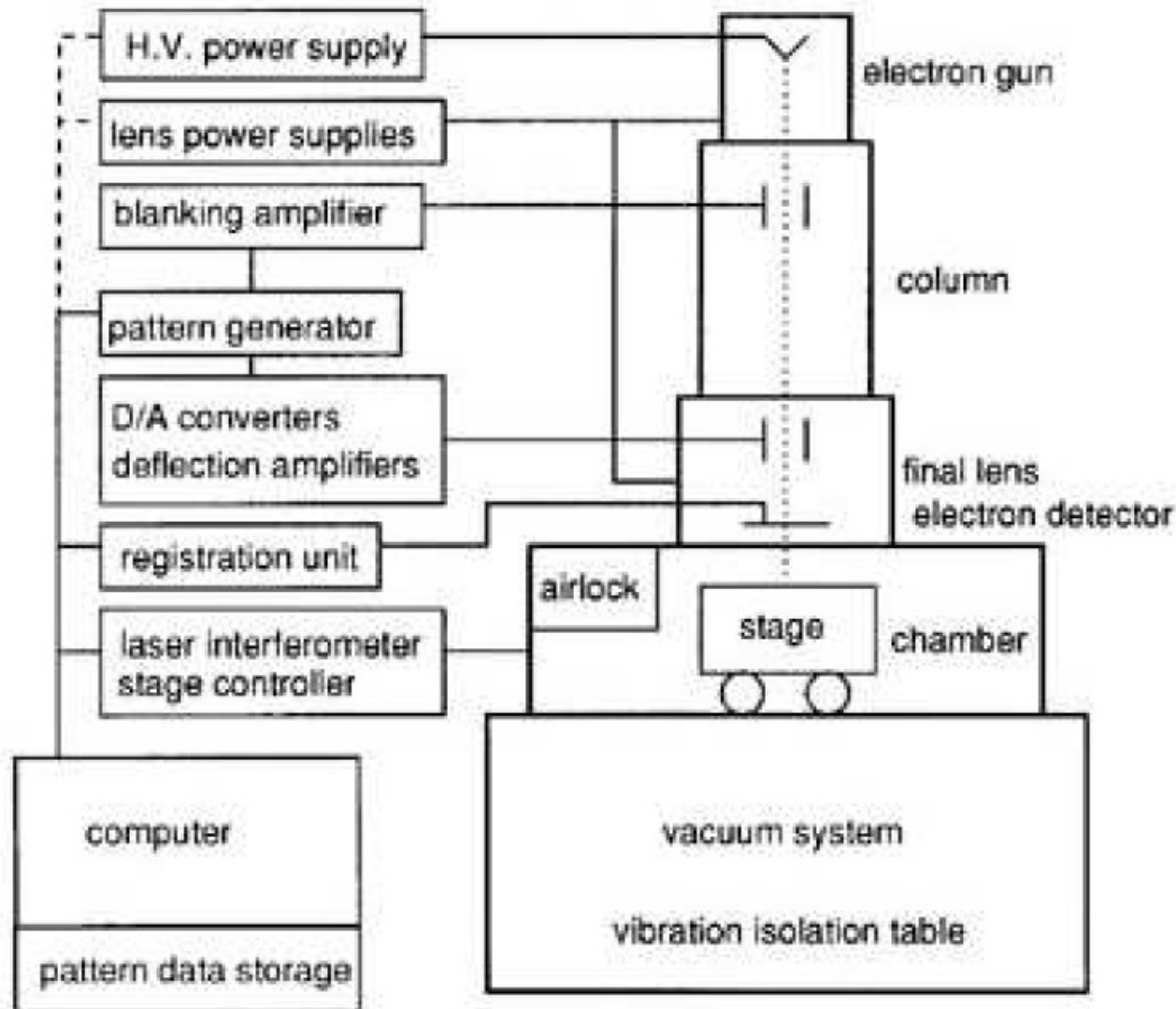
**Рис. 1.9.** Ширина запрещенной зоны при низкой температуре и постоянная решетки для полупроводников с кубической кристаллической структурой типа цинковой обманки и алмаза. Для сравнения представлены также гексагональные нитриды (приведены их постоянные решетки  $a$ )

# Модуляційно-леговані структури

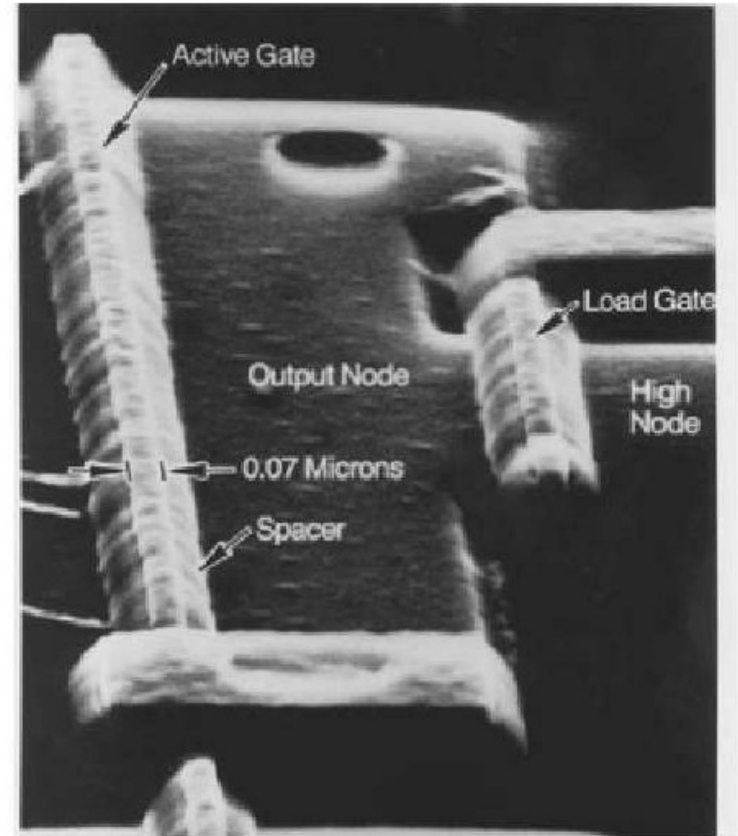
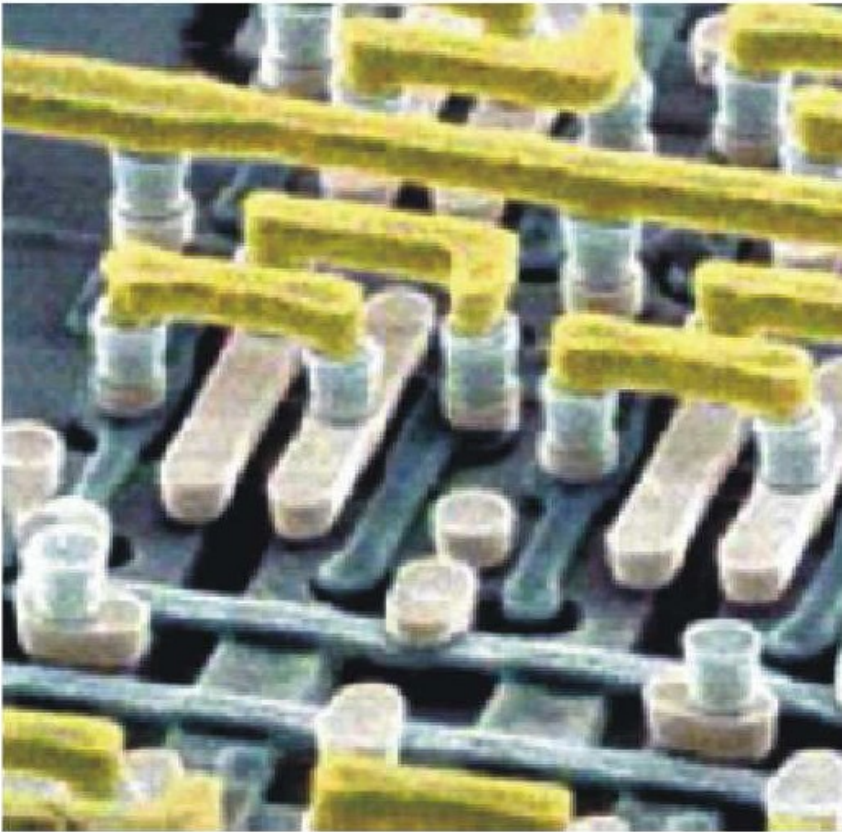


**Рис. 1.12.** Вид зоны проводимости в окрестности гетероперехода, образованного полупроводником А с малой шириной запрещенной зоны и полупроводником В с большой шириной запрещенной зоны

# Електронно-променева літографія



# Приклад структур, створених EBL



# Нанодрук

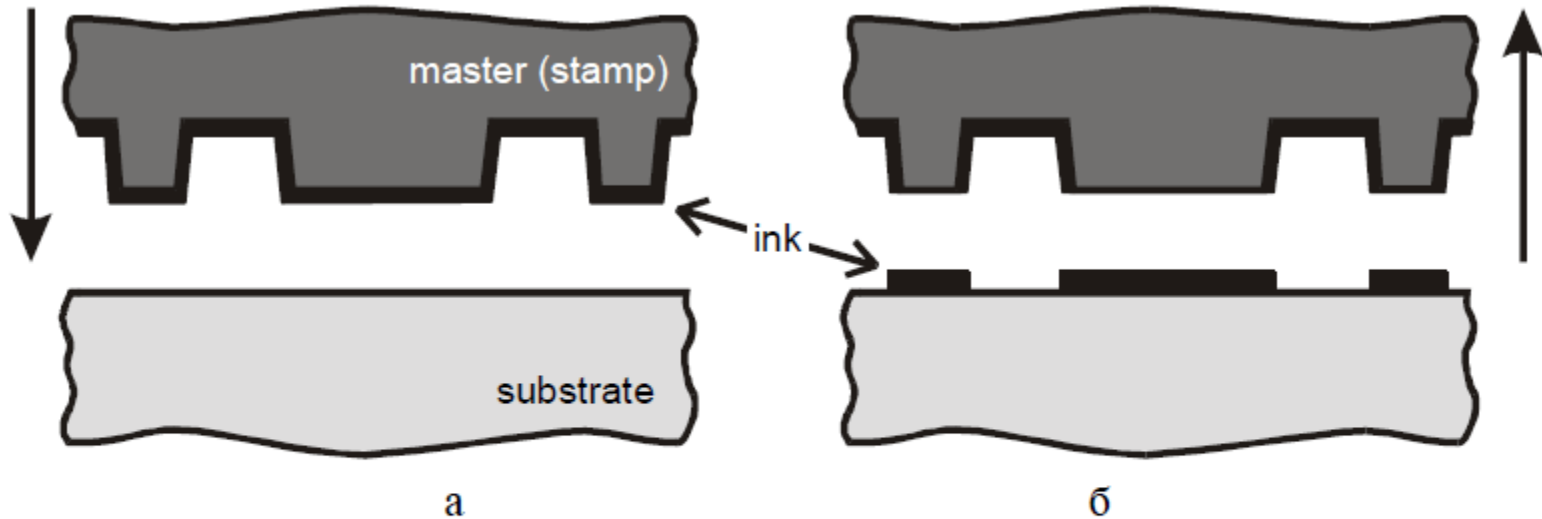


Рис. 3.11. Чернильная печать

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

# Молекулярно-пременныев методи

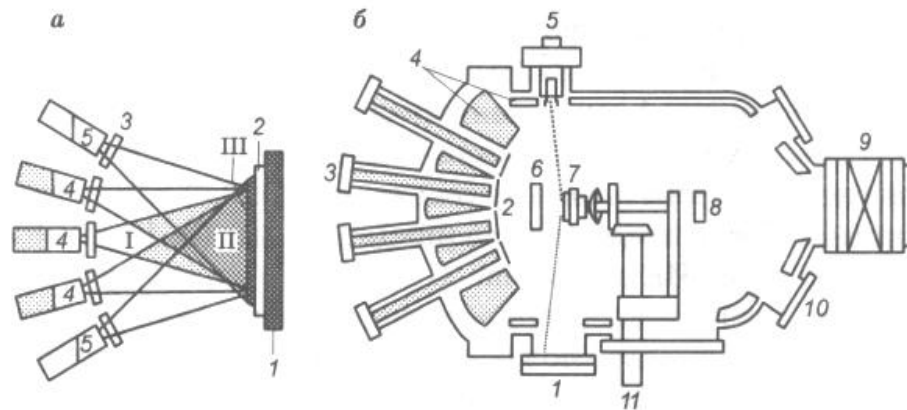


Рис. 8.1  
Схема эпитаксиального наращивания (а)  
и общая схема ростовой камеры (б)

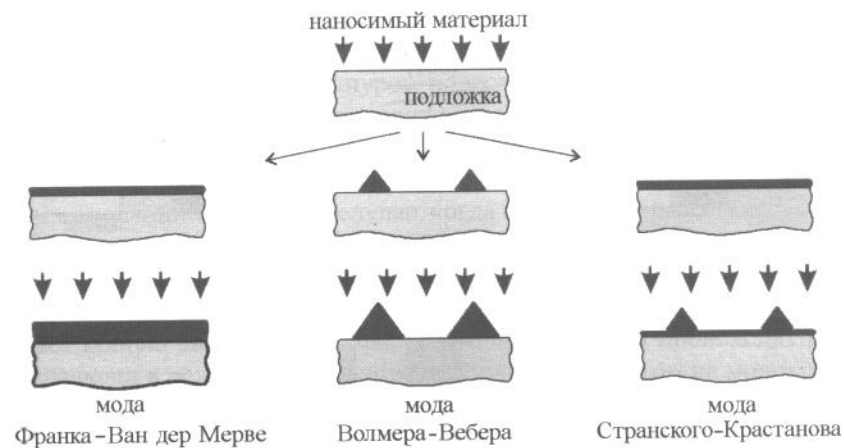
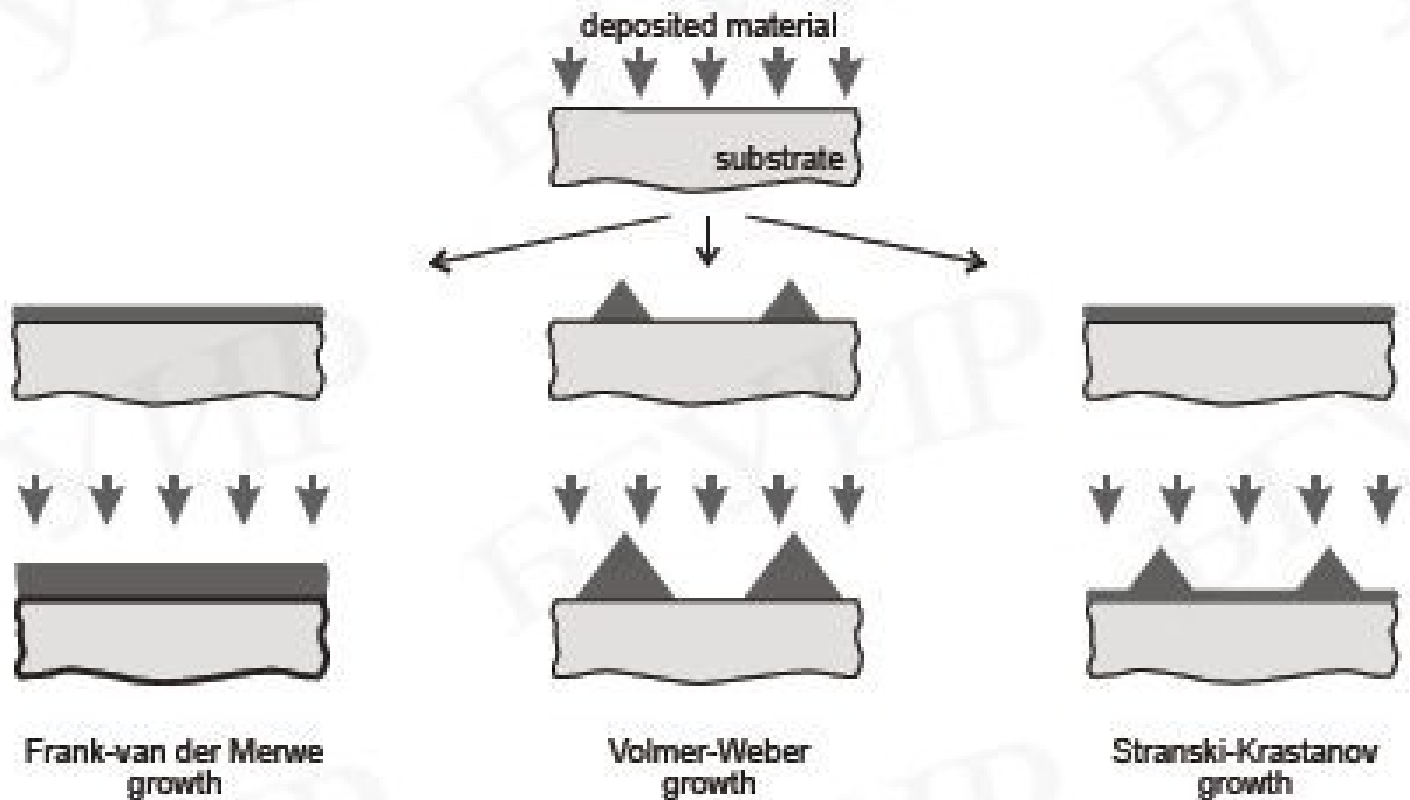
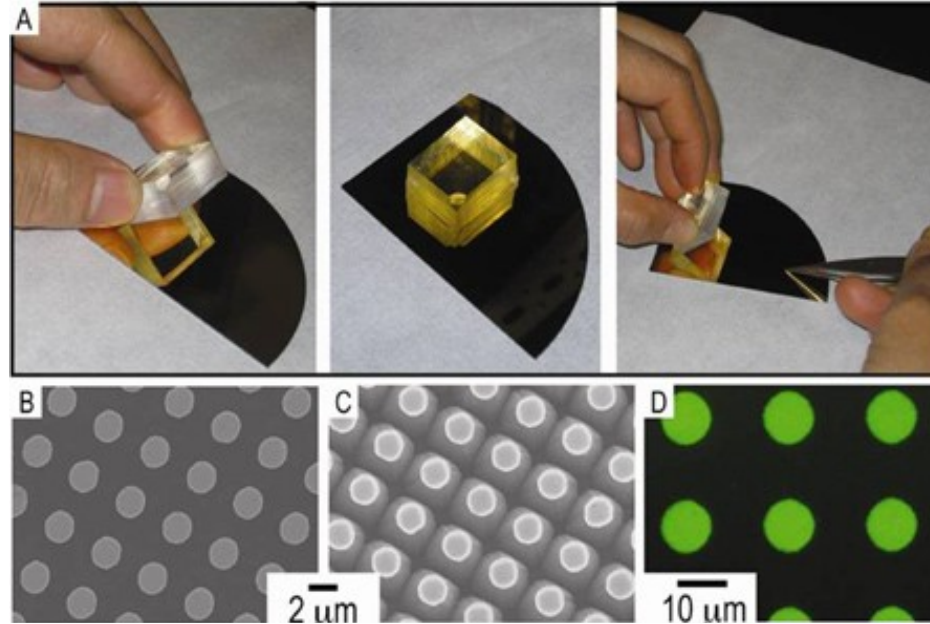


Рис. 2.17. Режимы роста тонких пленок

# Самоорганізація



# Приклади структур, створених по технології нанодруку



(A) Photographs of three major steps involved in  $\mu$ CP. (B) An SEM image of silver disks fabricated by  $\mu$ 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  $\mu$ CP.

На сьогодні все!  
ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

# Вуглець – основа життя

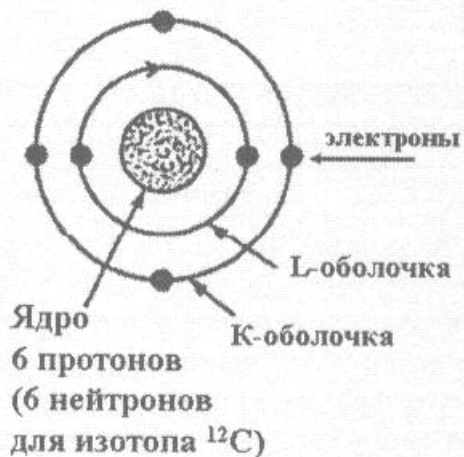


Рис. 3.3. Схематическое изображение электронной структуры атома углерода в основном состоянии

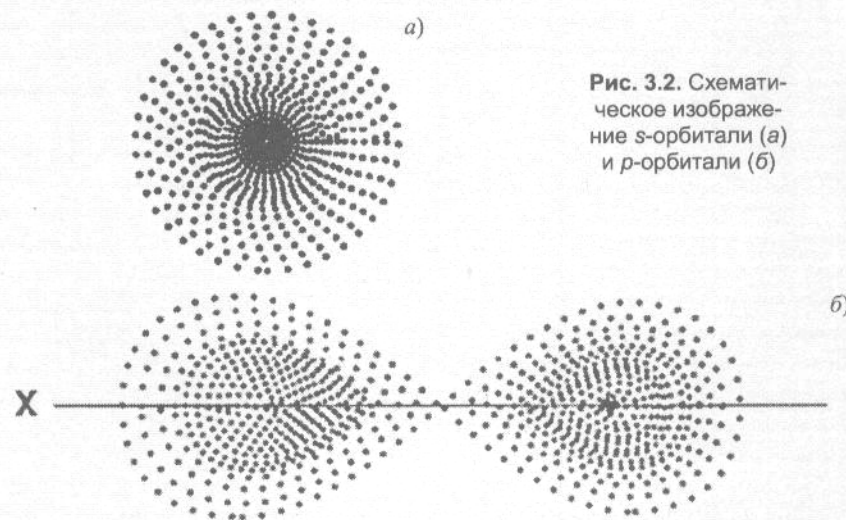


Рис. 3.2. Схематическое изображение s-орбитали (а) и p-орбитали (б)

# Типи гібридизації зв'язків ВУГЛЕІНУ

Таблиця 3.2

Электронные конфигурации атома углерода в основном состоянии

<i>K</i> -оболочка	<i>L</i> -оболочка			
1s орбиталь	2s орбиталь	2p <sub>x</sub> орбиталь	2p <sub>y</sub> орбиталь	2p <sub>z</sub> орбиталь
↑↓	↑↓	↓	↓	

Таблиця 3.5

Электронные конфигурации атома углерода с  $sp^2$ -гибридизацией валентных орбиталей

<i>K</i> -оболочка	<i>L</i> -оболочка			
1s орбиталь	2sp <sup>2</sup> орбиталь	2sp <sup>2</sup> орбиталь	2sp <sup>2</sup> орбиталь	2p орбиталь
↑↓	↓	↓	↓	делокализованный p-электрон

Таблиця 3.3

Электронные конфигурации атома углерода с  $sp^3$ -гибридизацией валентных орбиталей

<i>K</i> -оболочка	<i>L</i> -оболочка			
1s орбиталь	2sp <sup>3</sup> орбиталь	2sp <sup>3</sup> орбиталь	2sp <sup>3</sup> орбиталь	2sp <sup>3</sup> орбиталь
↑↓	↓	↓	↓	↓

<sup>9</sup> Тетраэдрическая конфигурация атомов углерода была впервые предложена голландским химиком Якобом Вант Гоффом в 1874 (первая Нобелевская премия по химии, 1901 г.).

# Різноманіття вуглецевих сполук

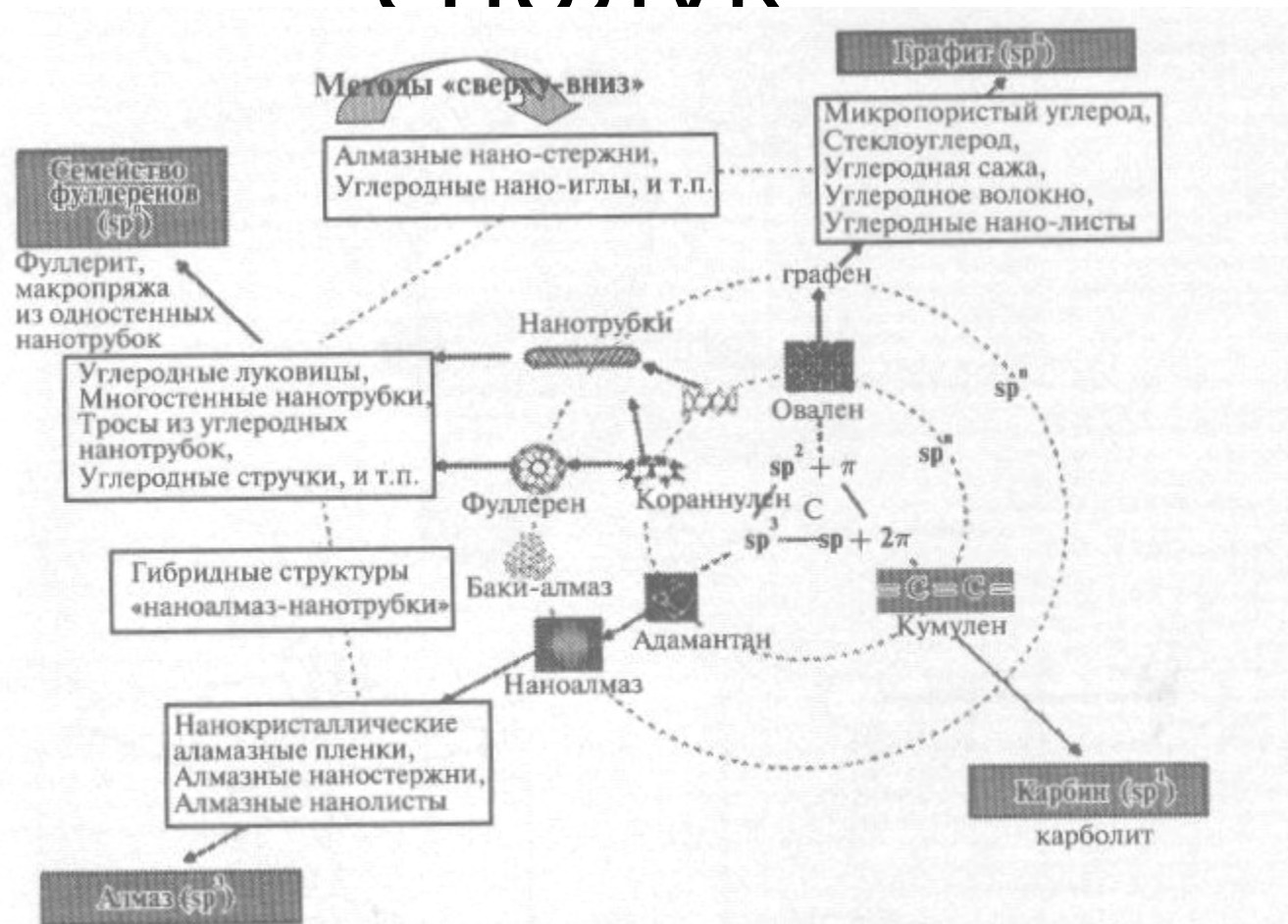
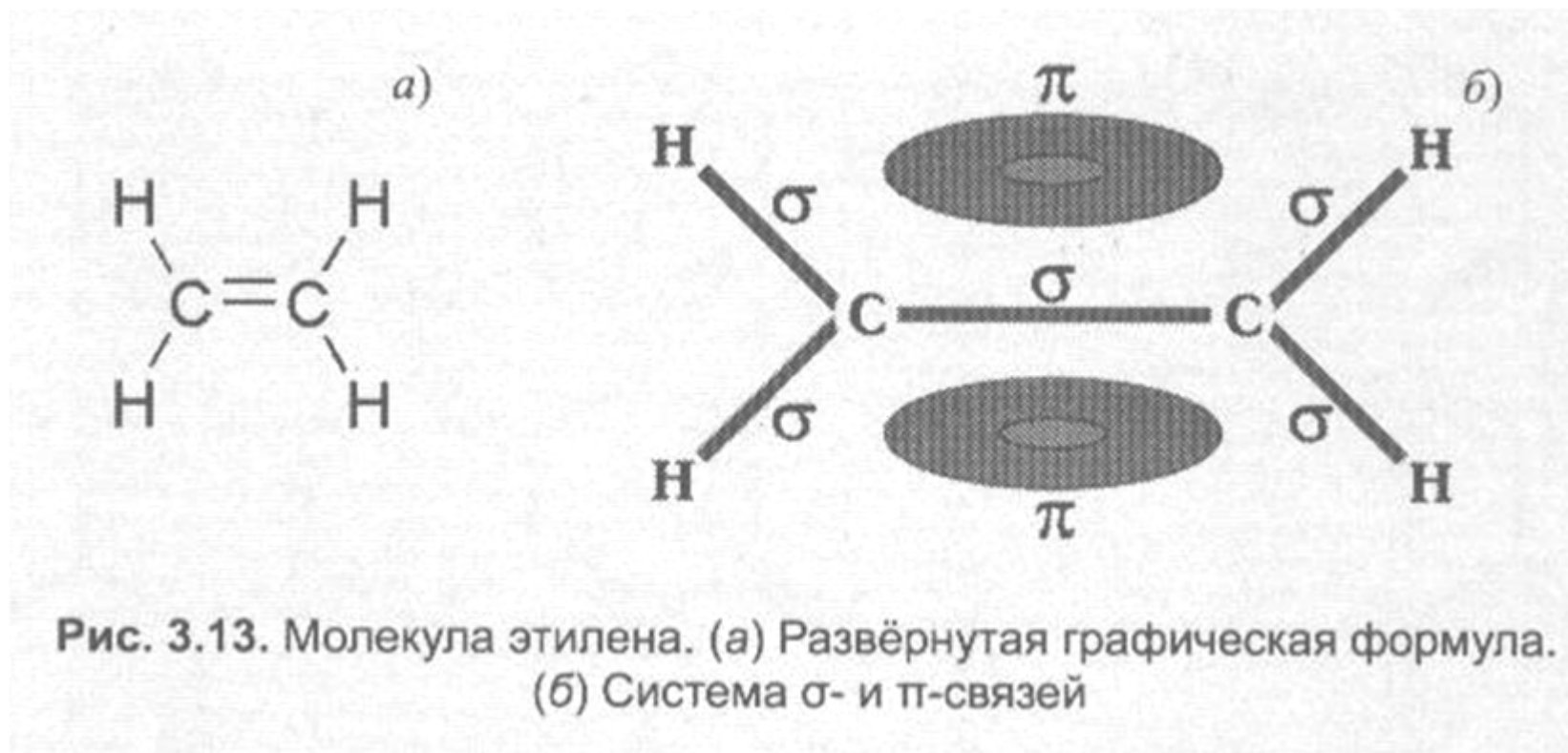


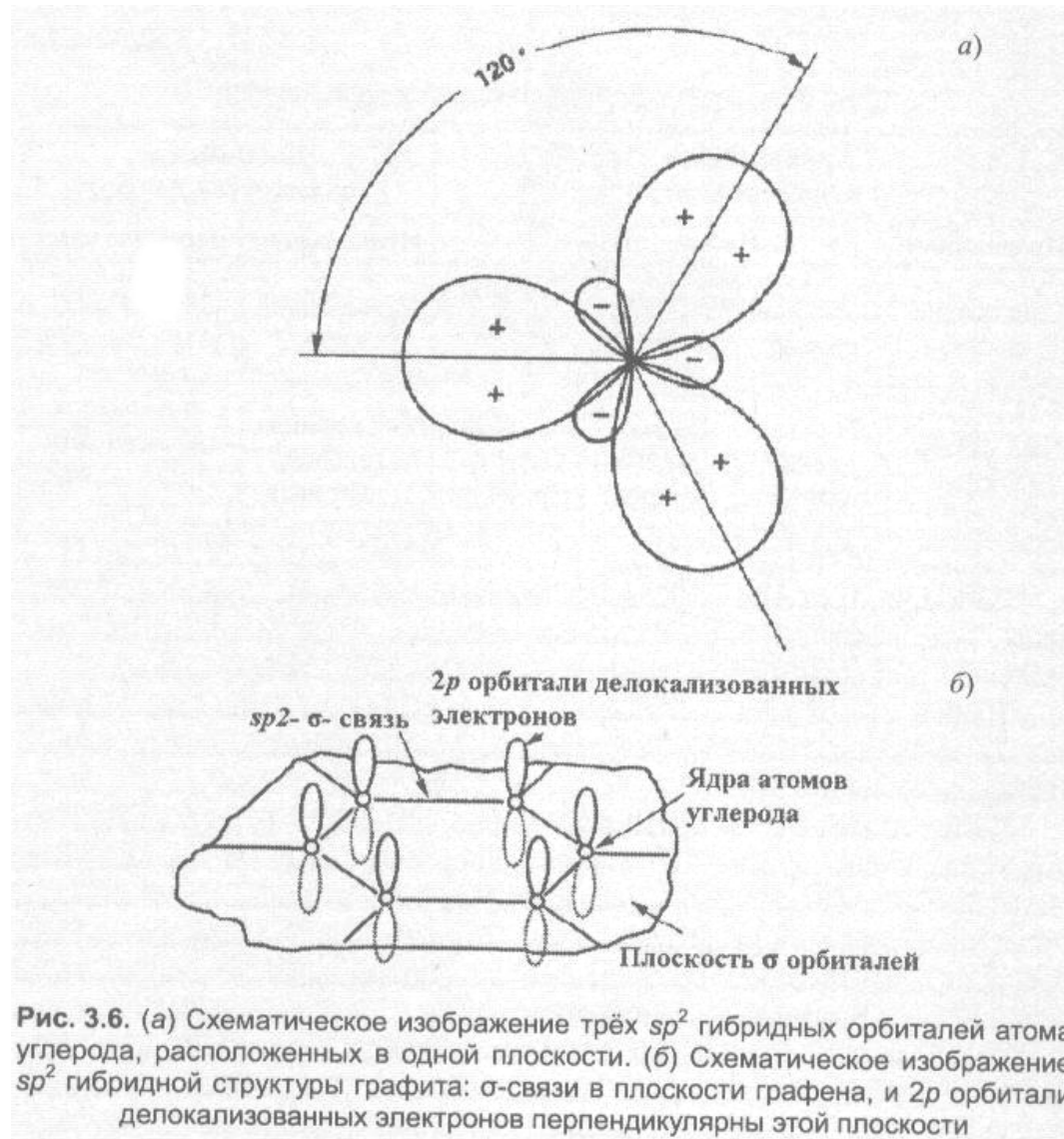
Рис. 3.4. Классификация аллотропных модификаций углерода на основе типа гибридизации атомных орбиталей ( $sp^3$ ,  $sp^2$ ,  $sp$  и  $sp^n$ , где  $n$  — нецелое число) и характерного размера (отмечено пунктирными концентрическими кругами)

# Гібридизація $sp^1$

## Алкени, Карбини



# Гібридизація $sp^2$



# Гібридизація $sp^3$

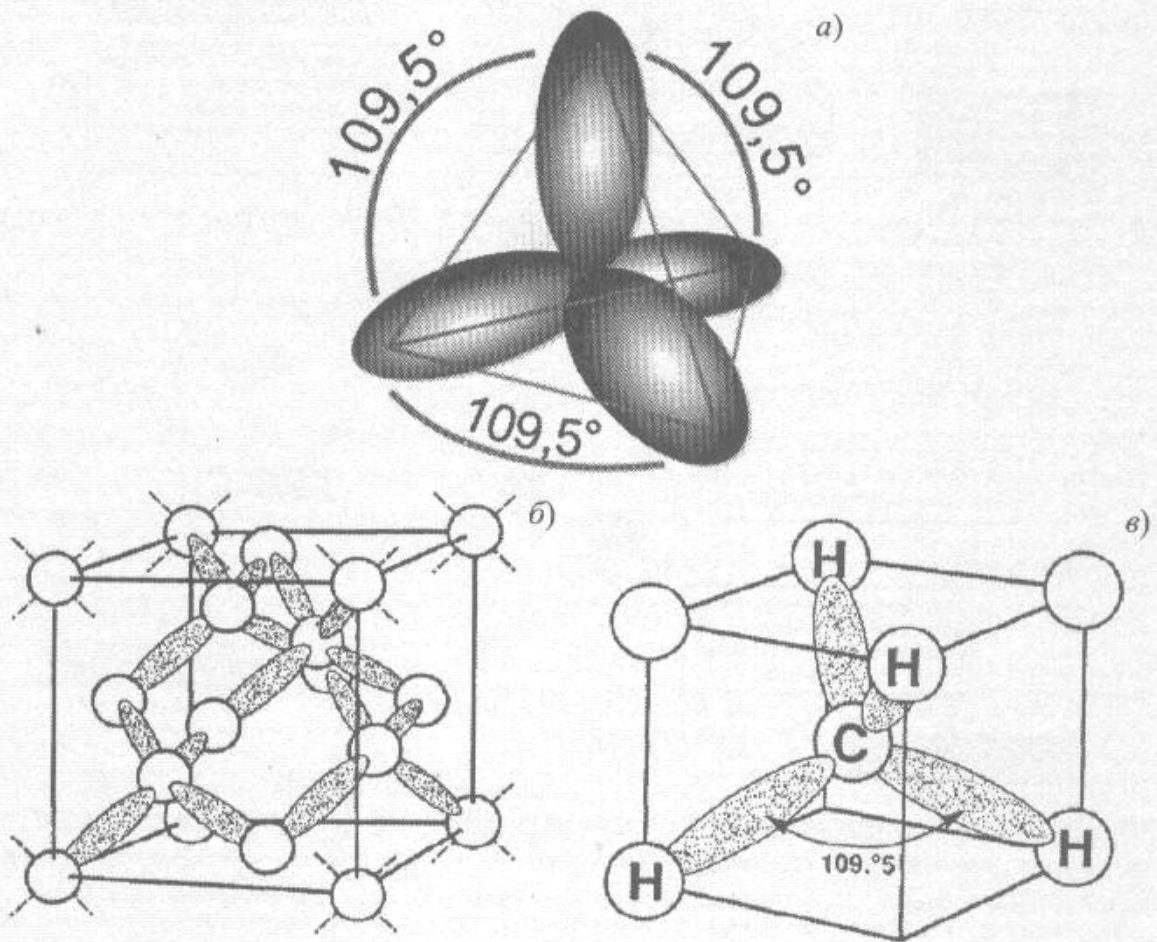


Рис. 3.5. (а) Тетраэдрическая конфигурация четырёх  $sp^3$  гибридных орбиталей атома углерода. (б) Тетраэдрическая конфигурация четырёх  $\sigma$ -связей углерод-углерод в кристалле алмаза. (в) Тетраэдрическая конфигурация четырёх одинарных C-H связей в молекуле метана ( $CH_4$ )

# Бджолині соти

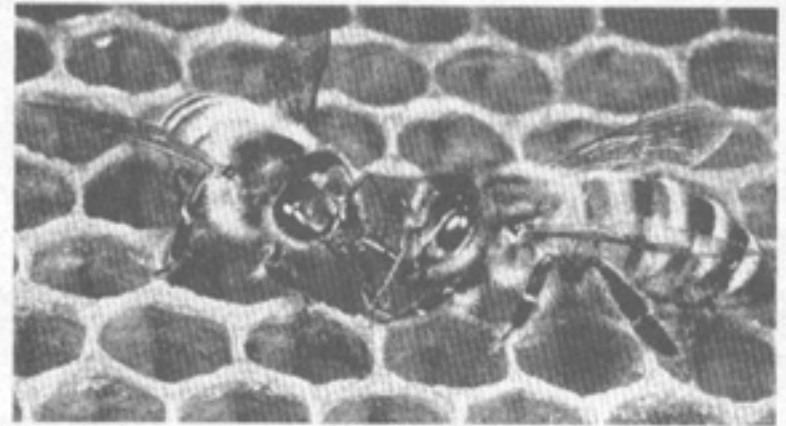
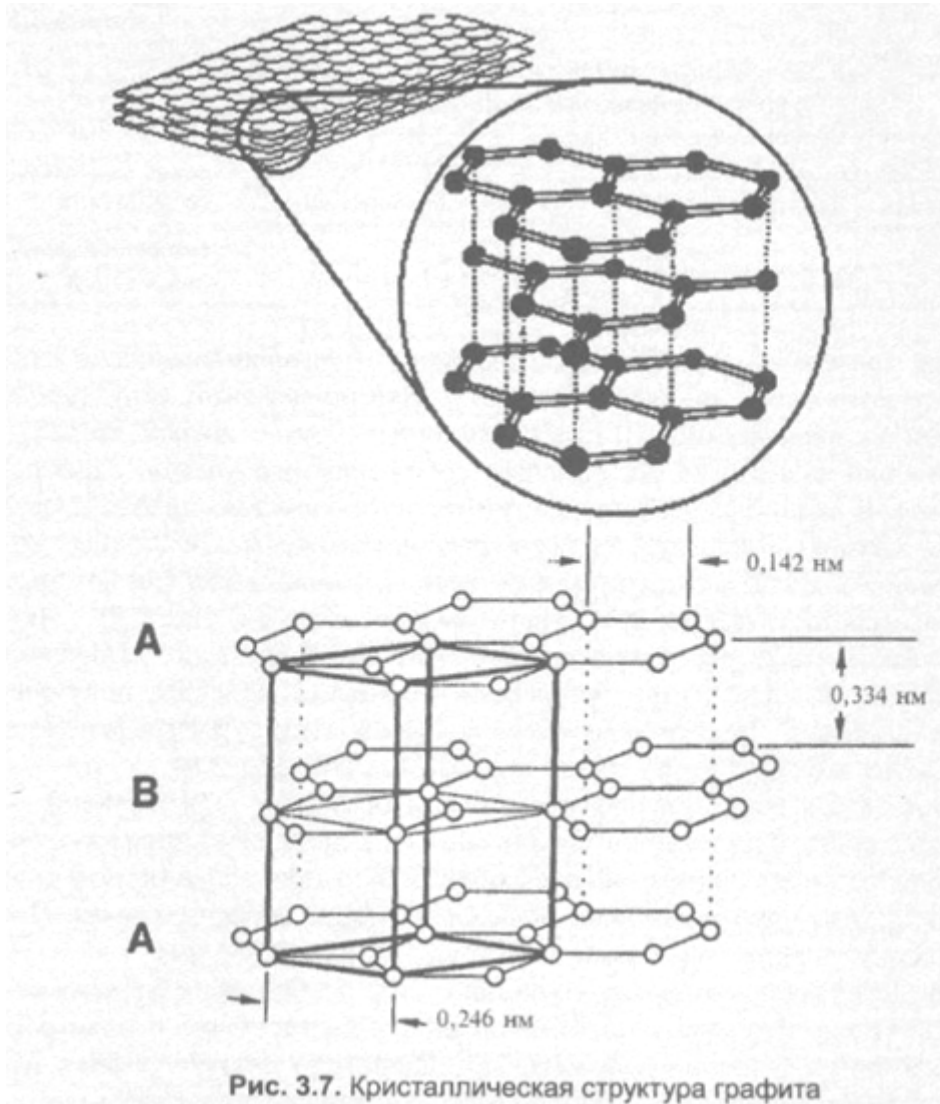
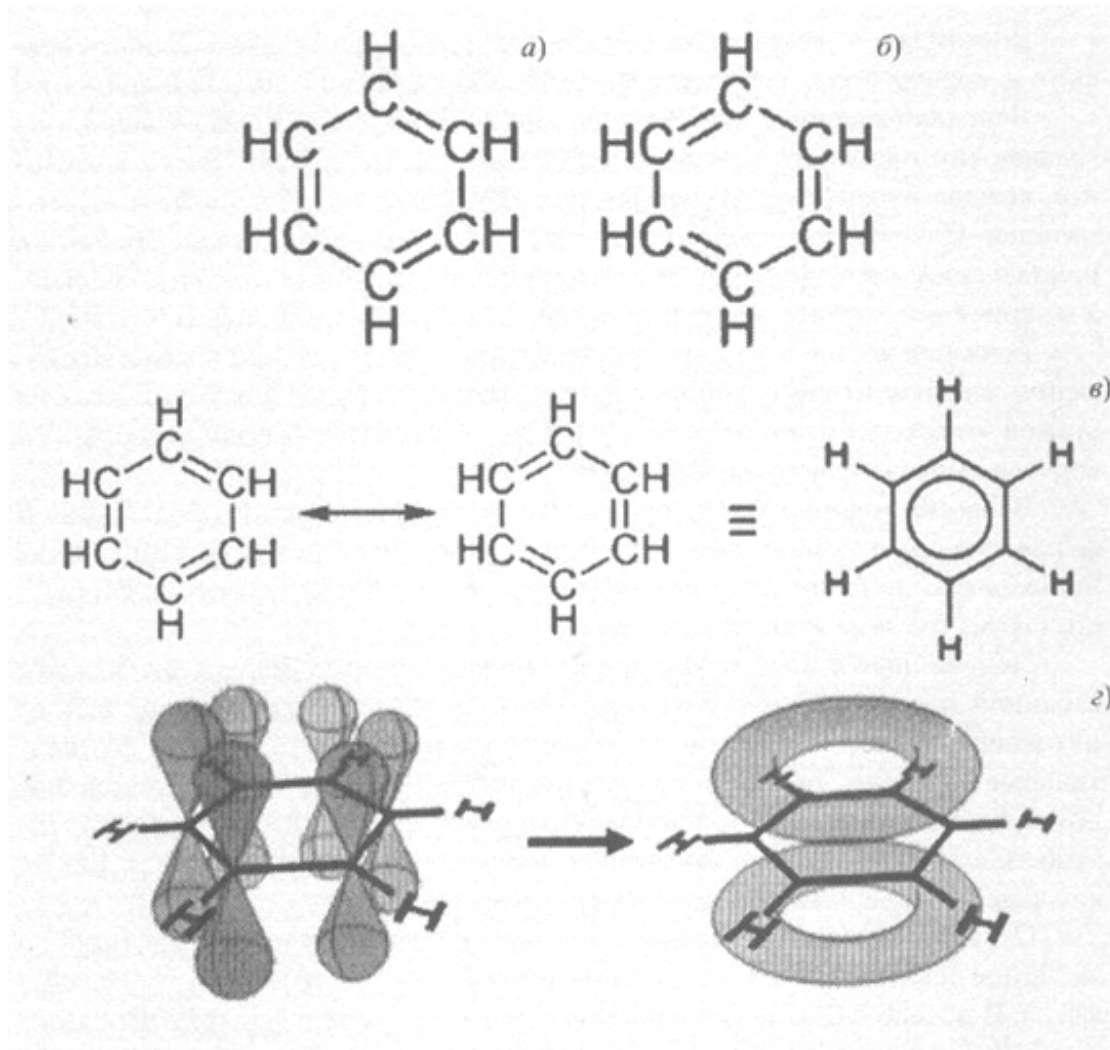


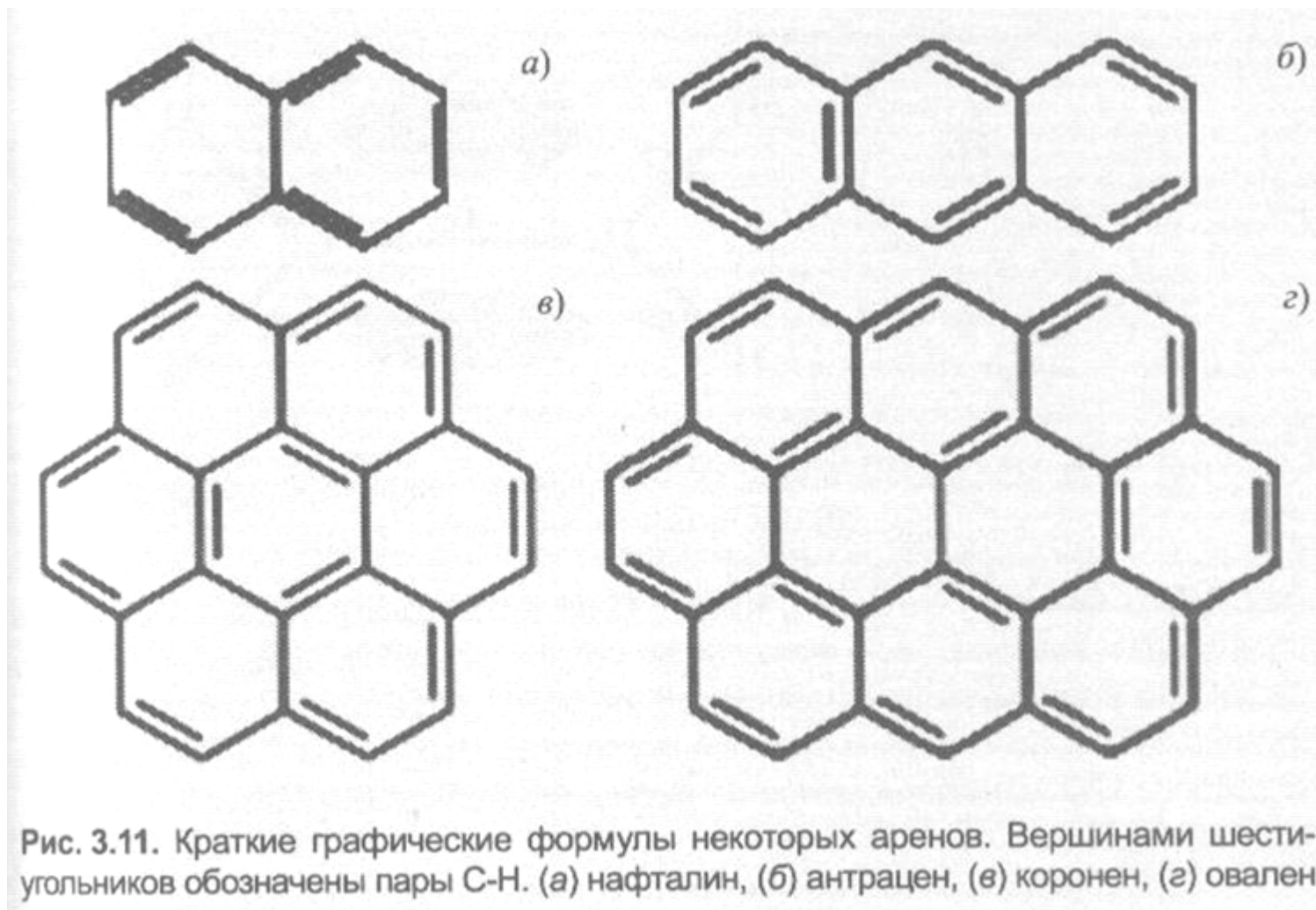
Рис. 3.8. Пчелиные соты — одна из самых совершенных конструкций на нашей планете

# Бензоли



**Рис. 3.9.** Молекула бензола. (а–б) Развёрнутые графические формулы двух изомеров бензола (две из пяти идеальных форм Кекуле—Дьюара). (в) В современной химической литературе  $\pi$ -систему делокализованных электронов обозначают кружком. (г) Система  $\sigma$ -связей и  $\pi$ -связей в молекуле бензола

# Арены



$(4n + 2)$   $\pi$  электроны    Бензол  $C_6H_6$  ( $n=1$ )    Нафталин  $C_{10}H_8$  ( $n=2$ )    Антрацен  $C_{14}H_{10}$  ( $n=3$ )

# Молекули BUCKY-BAWLE

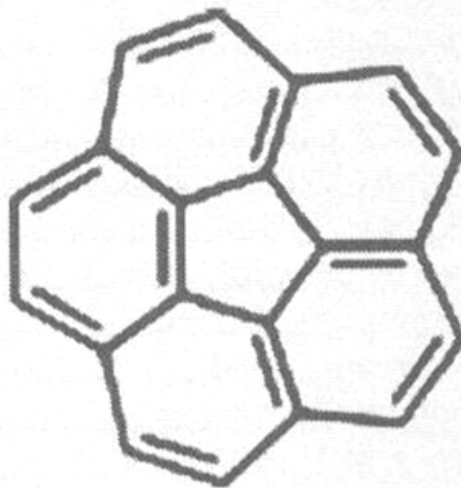
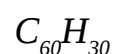
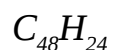
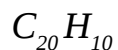


Рис. 3.12. Краткая графическая формула кораннулена,  $C_{20}H_{10}$



Барт і Лоутон синтезували кораннулен в 1966 р.  
А в 1970 році Ейдзи Осава передбачив стабільність  
молекули  $C_{60}$

# Молекулы BUCKY-BALL



Рис. 4.1. Молекула C<sub>60</sub> (а) и футбольный мяч (б) в форме усечённого икосаэдра; (в) химические связи между атомами углерода в молекуле C<sub>60</sub>

# Як отримати усічений ікосаедр

(ікосаедр Архімеда з ікосаедра Платона)

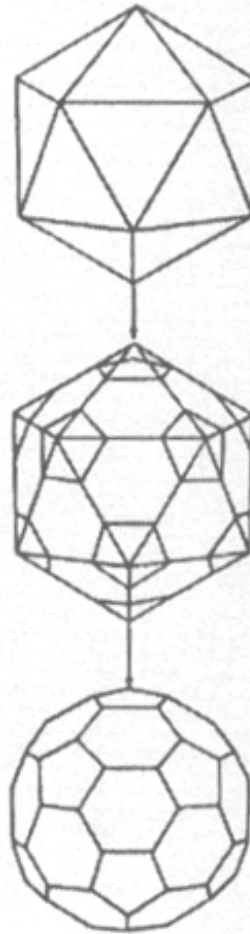


Рис. 11.6. Как сконструировать архимедов усечённый икосаэдр из платонова икосаэдра?

# Відкриття фулерену $C_{60}$ (1985 р.)

**Гарольд Крото** – англійський відомий вчений в області мікрохвильової спектроскопії та радіоастрономії (університет Сассекс)

**Річард Смолі** – американський вчений в області плазменних методів формування кластерів тугоплавких металів (університет Райса з штату Техас)

**Роберт Кёрл** – американський вчений з цього ж університету, який вивчав формування кластерів напівпровідників.

# Метод Річарда Смолі

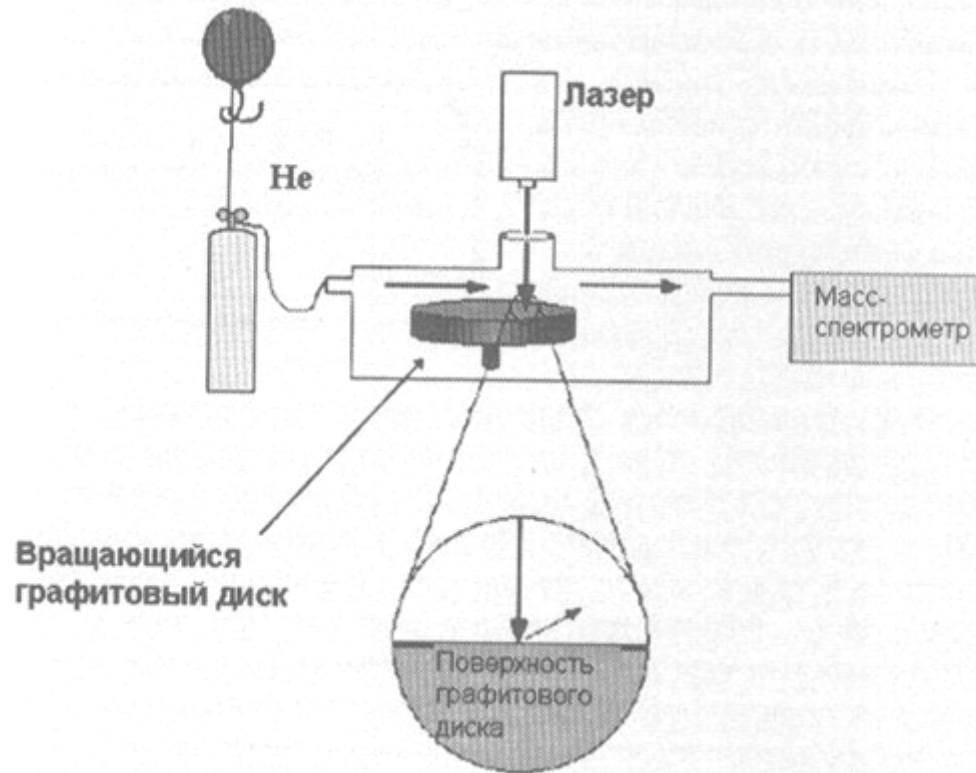


Рис. 8.2. Источник для получения кластерных пучков тугоплавких элементов методом лазерного испарения [21]. В углеродных экспериментах использовалась мишень в виде медленно вращающегося графитового диска, что обеспечивало высокое качество облучаемой поверхности. Импульс испаряющего лазерного излучения с длиной волны 532 нм, длительностью 5 нс и энергией 30–40 мДж фокусируется на поверхность графита. Импульсное сопло пропускает гелий через эту зону испарения

# Результати спостережень

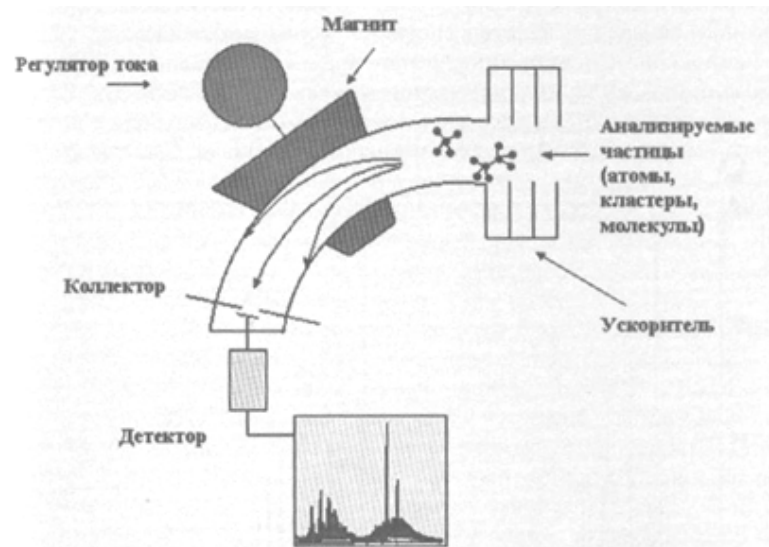


Рис. 8.3. Принципиальная схема масс-спектрометра

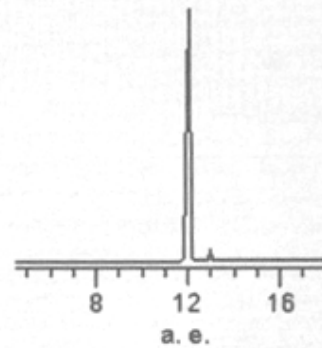


Рис. 8.4. Масс-спектр атомов углерода

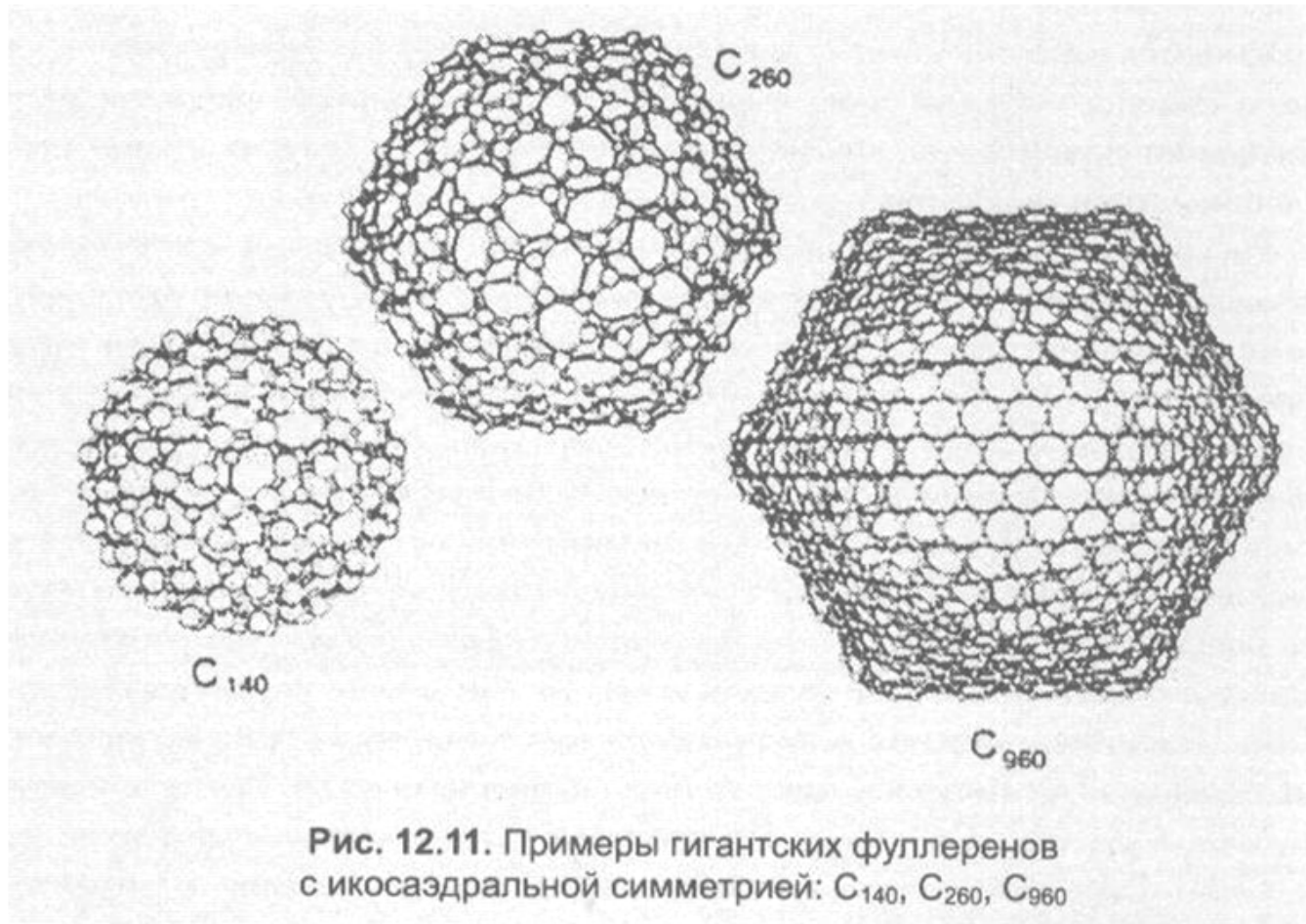
# Фуллереновый ряд

Таблица 12.1

Возможные (с топологической точки зрения) молекулы  
икосаэдральных фуллеренов: их группы симметрии и диаметры  $d$  [26]

Молекула $C_n$	Группа симметрии	$d, \text{\AA}$
$C_{20}$	$I_h$	3,97
$C_{60}$	$I_h$	6,88
$C_{80}$	$I_h$	7,94
$C_{140}$	$I$	10,50
$C_{180}$	$I_h$	11,91
$C_{240}$	$I_h$	13,75
$C_{260}$	$I$	14,31
$C_{320}$	$I_h$	15,88
$C_{380}$	$I$	17,30
$C_{420}$	$I$	18,19
$C_{500}$	$I_h$	19,85
$C_{540}$	$I_h$	20,63
$C_{560}$	$I$	21,00
$C_{620}$	$I$	22,10
$C_{720}$	$I_h$	23,82
$C_{740}$	$I$	24,15
$C_{780}$	$I$	24,79
$C_{860}$	$I$	26,03
$C_{960}$	$I_h$	27,50
$C_{980}$	$I_h$	27,79
$C_{980}$	$I$	27,79
...	...	...

# Фуллерени



# Бакмінстер Фуллер

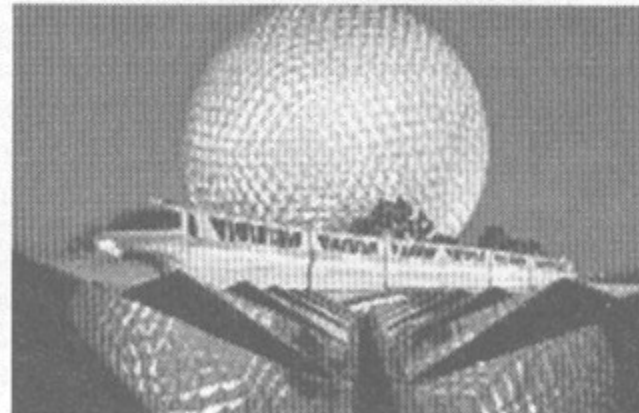
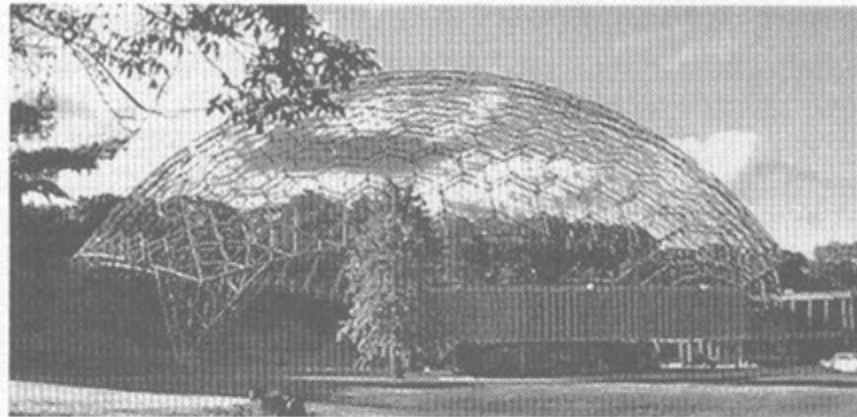
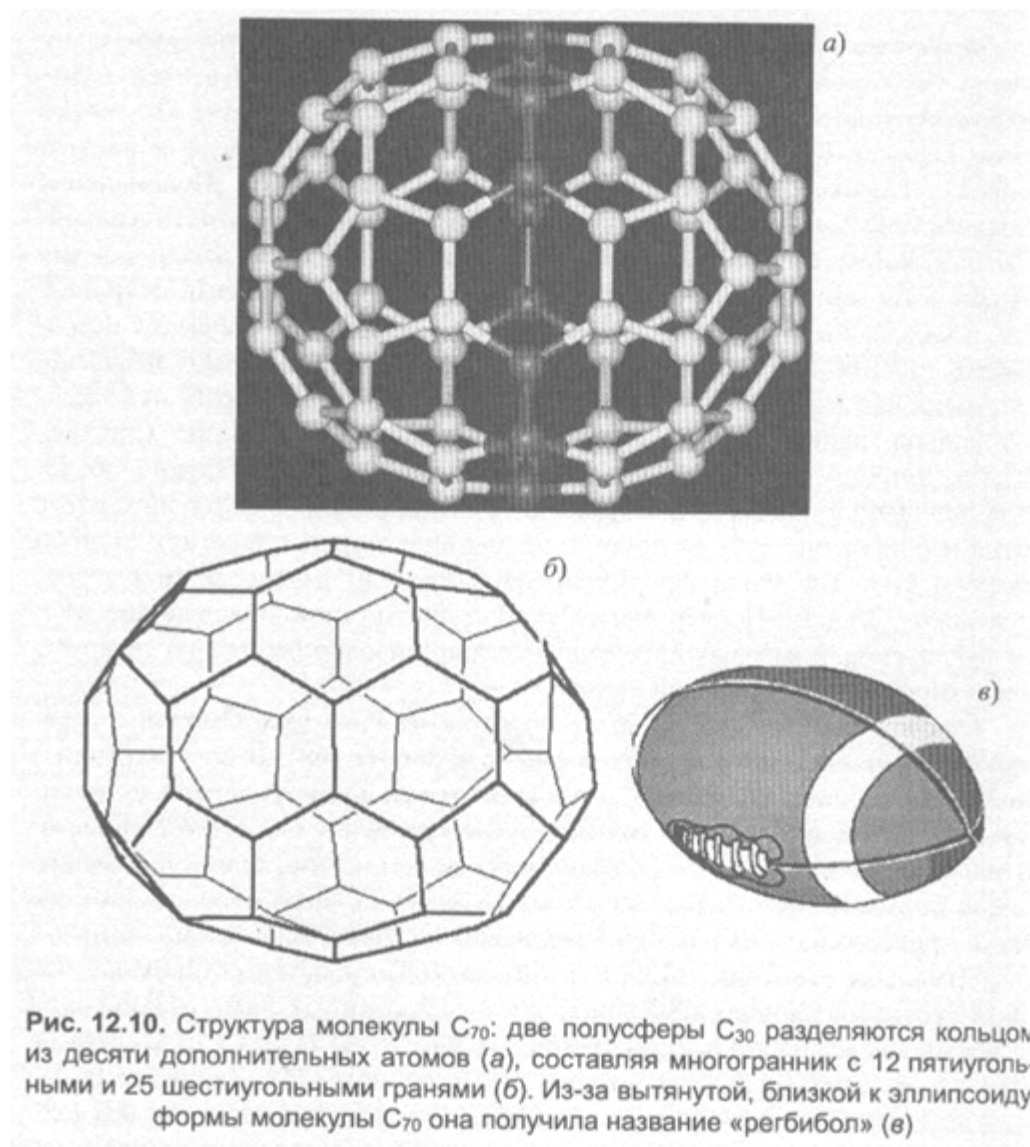


Рис. 10.2. Геодезические купола Бакминстера Фуллера: (а) штаб-квартира Международного Общества Информации по Материалам (Кливленд, штат Огайо); (б) Баки перед павильоном первой выставки США в Москве в 1959 году; (г) павильон «Космос — Земля» в Дисней-ленде. Фото с сайтов [www.britanica.com](http://www.britanica.com) и <http://www.thirteen.org/cgi-bin/bucky-bin/bucky.cgi>



# Відкриття вуглецевих нанотрубок

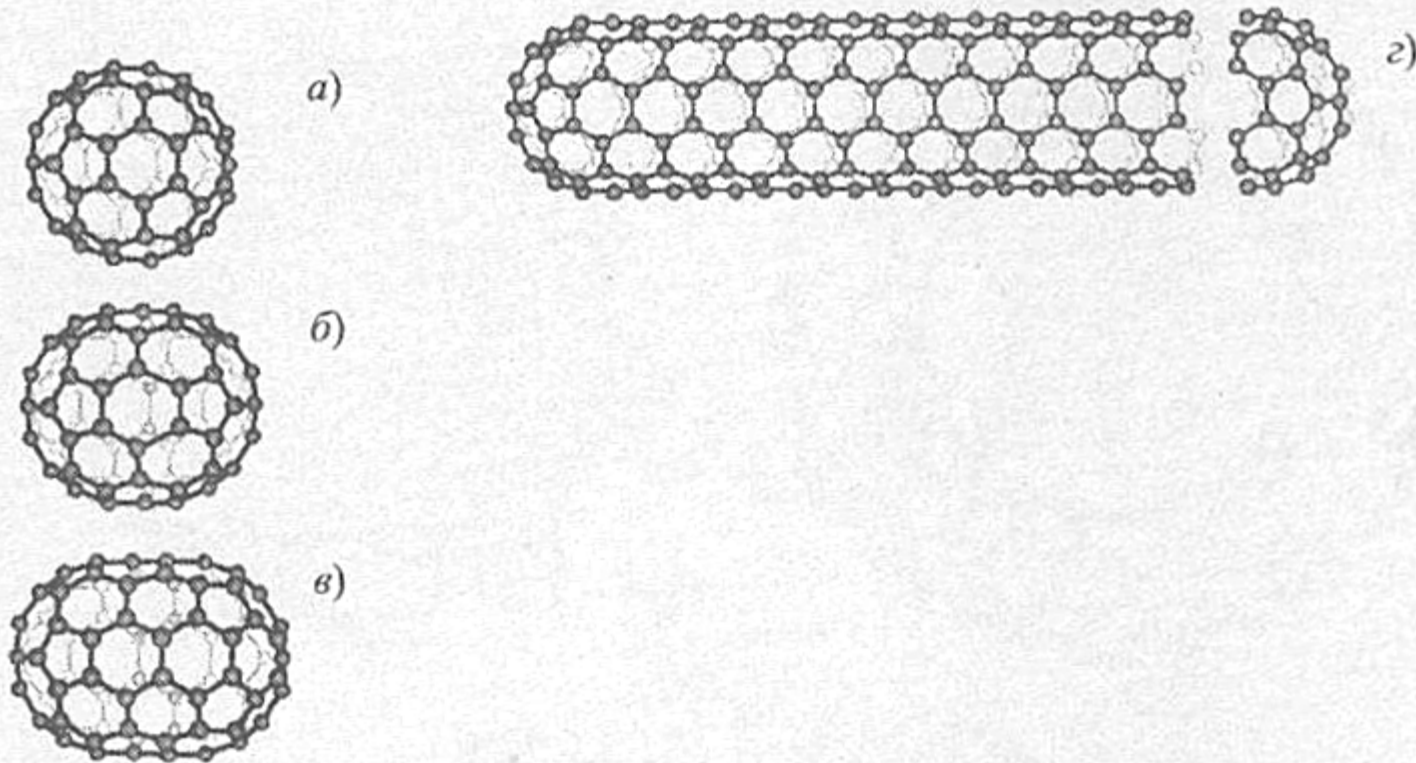


Рис. 12.13. Превращение бакминстерфуллера в углеродную нанотрубку с помощью последовательного добавления экваториальных колец из десяти атомов углерода: (а) C<sub>60</sub>, (б) C<sub>70</sub>, (в) C<sub>80</sub>, (г) углеродная нанотрубка C<sub>1000000</sub>

# Властивості вуглецевих нанотрубок

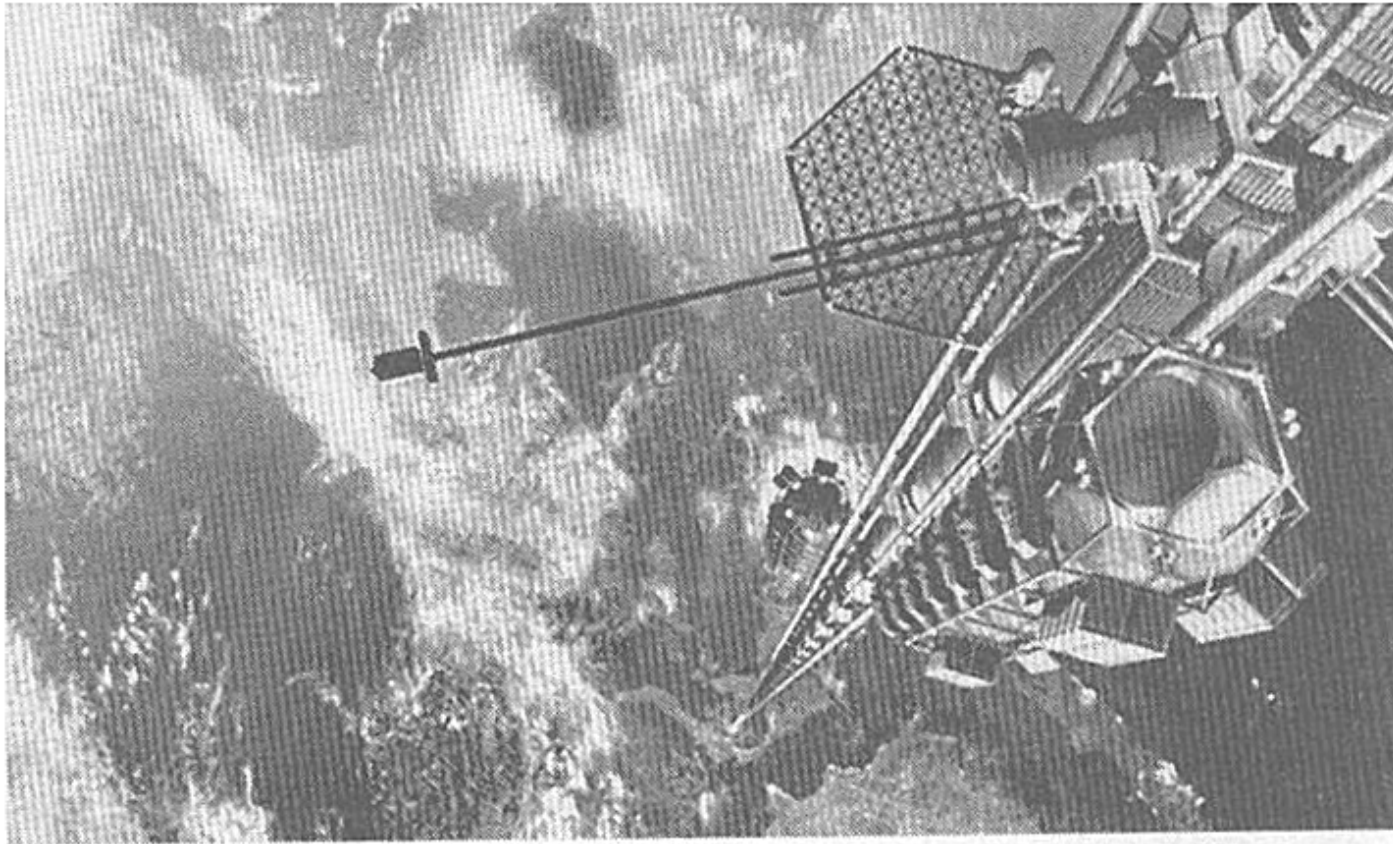
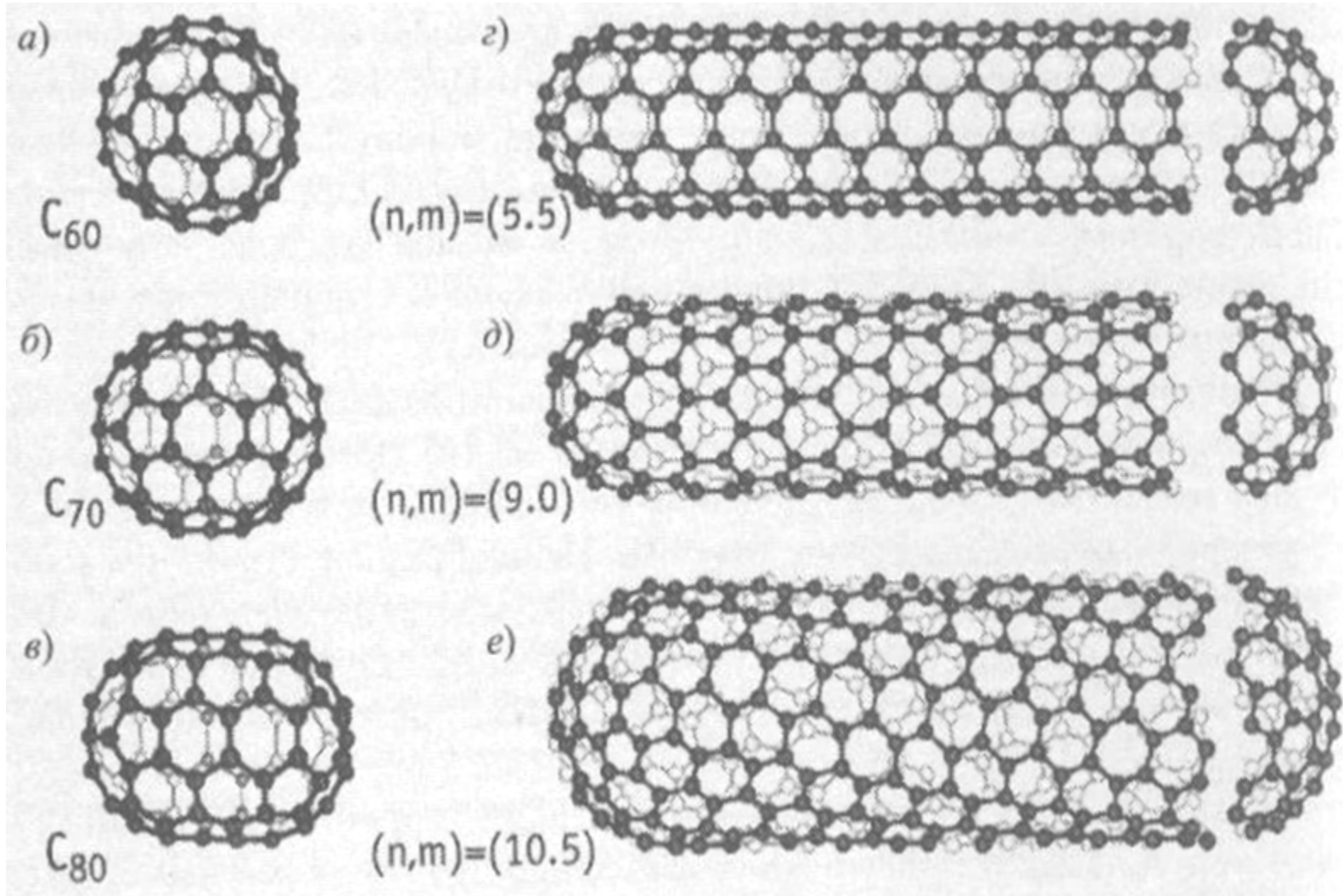
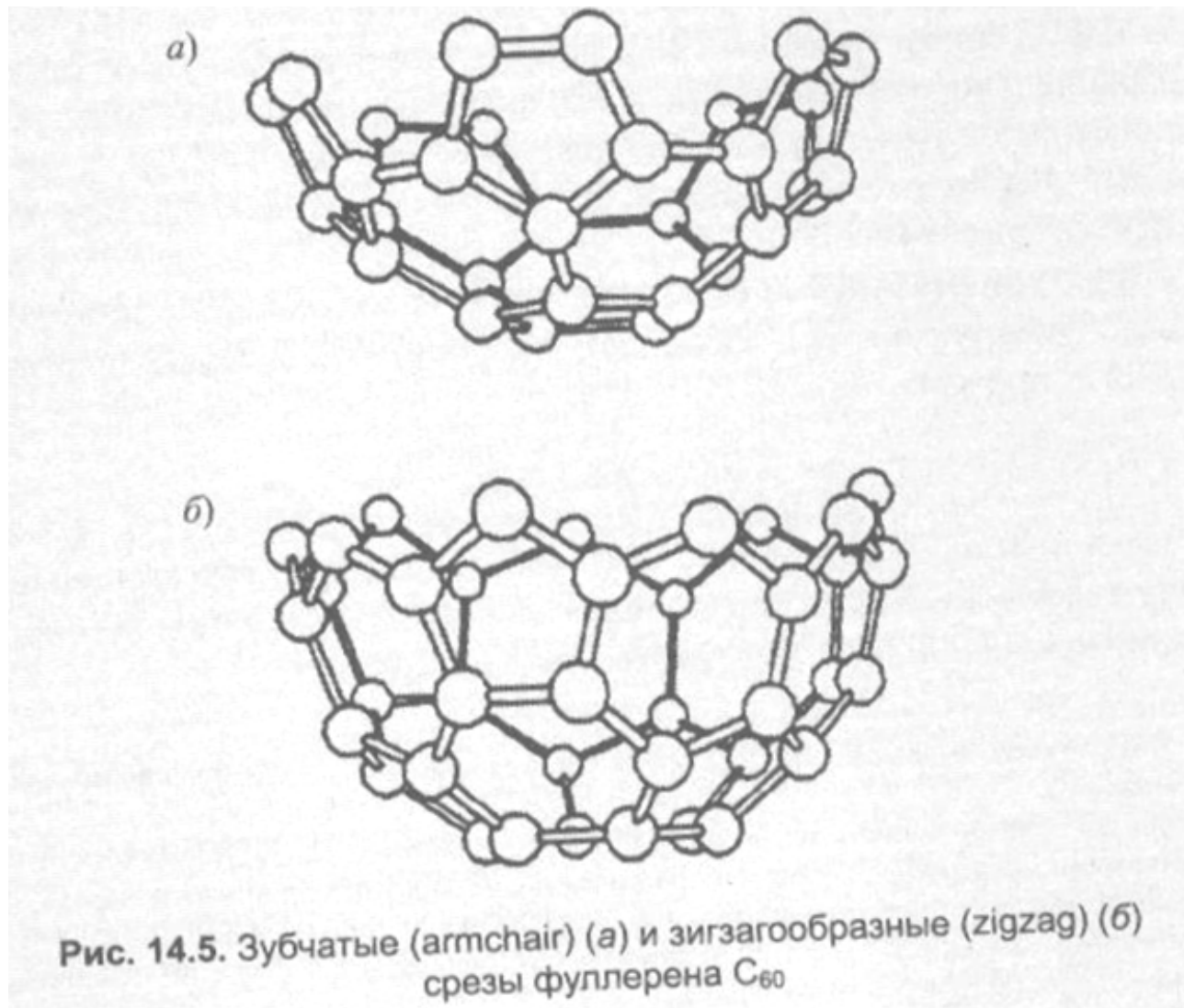


Рис. 14.24. Космический лифт по версии НАСА

# Хіральність нанотрубок



# Перерізи молекули $C_{60}$



# Індекси хіральності

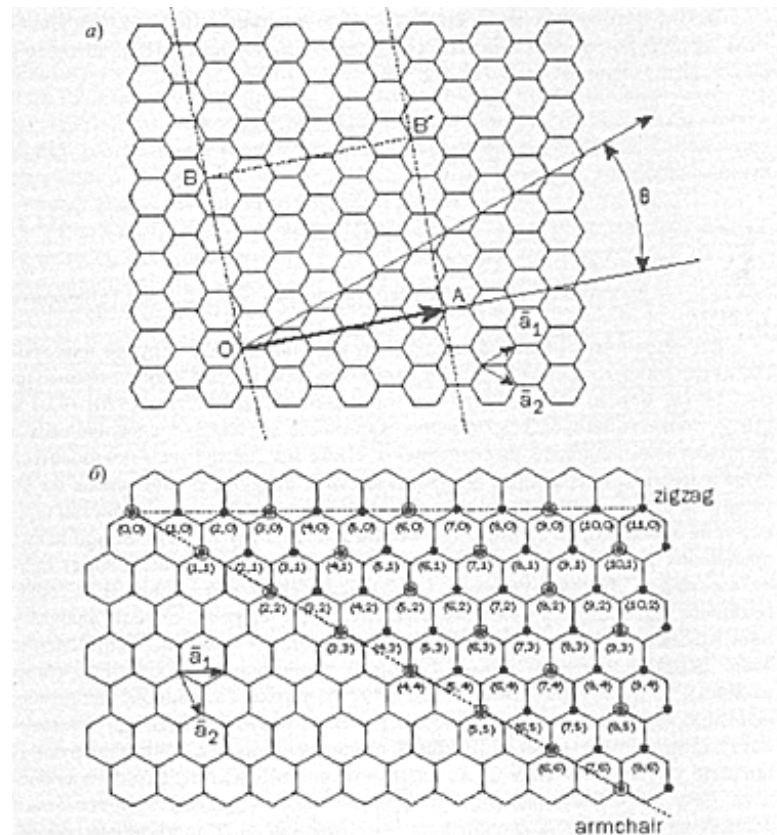


Рис. 14.6. Углеродная нанотрубка, свернутая из двумерного листа графена. (а) хиральный вектор  $C_h$  определяется как  $C_h = la_1 + ma_2$ , где  $a_1$  и  $a_2$  — единичные векторы, а  $l$  и  $m$  — целые числа. Хиральный угол  $\theta$  измеряется по отношению к оси зигзага (а<sub>1</sub>). Данная диаграмма сконструирована для  $(l, m) = (4, 2)$ , а элементарная ячейка этой нанотрубки ограничена многоугольником OAB'B. Чтобы образовать нанотрубку, представим себе, что эта ячейка свернута таким образом, что O встречается A, а B встречается B' и два конца нанотрубки завершаются половинками молекулы фуллерена. (б) zigzag нанотрубки соответствуют  $(n, 0)$  или  $(0, m)$ , и имеют хиральный угол  $0^\circ$ . Armchair нанотрубки имеют  $(l = m)$  и хиральный угол  $30^\circ$ , в то время как хиральные нанотрубки имеют любые значения  $(n, m)$  и хиральные углы от  $0$  до  $30^\circ$ . Точки в кружках обозначают нанотрубки с металлическими свойствами, а малые точки соответствуют полупроводящим нанотрубкам

# Електронні прилади

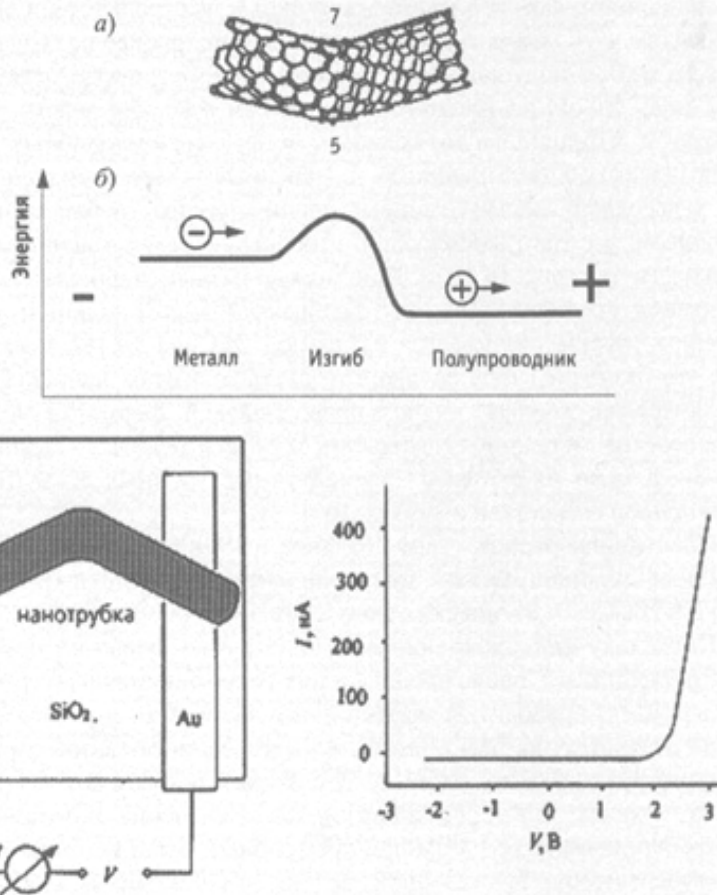


Рис. 14.18. (а) Изгиб углеродной нанотрубки за счёт введения дефекта «семиугольник-пятиугольник», (б) влияние изгиба нанотрубки на энергию подвижных электронов, (в) выпрямляющий диод Шоттки на изогнутой нанотрубке. Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами

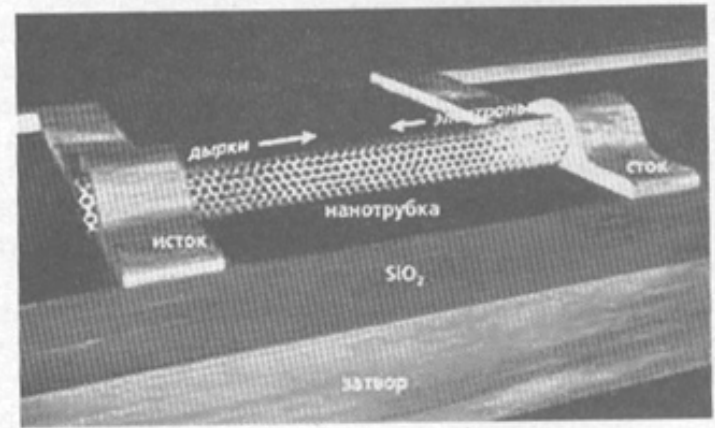


Рис. 14.19. Полевой транзистор на полупроводниковой нанотрубке. Нанотрубка лежит на слое изолятора (кварц) в контакте с двумя сверхтонкими металлическими электродами, в качестве третьего электрода (затвора) используется подложка кремния [108]

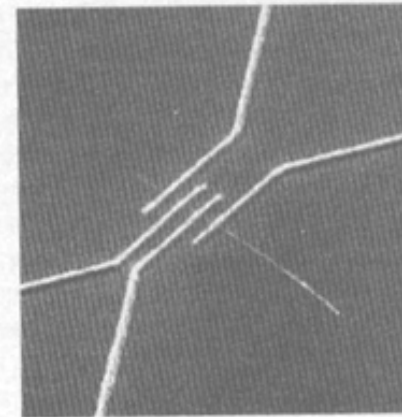


Рис. 14.20. Приборная структура для измерения удельного электрического сопротивления индивидуальных нанотрубок четырёхконтактным способом [110]

# Наномеханізми



Рис. 5.32. “Наноподшипник” на двух нанотрубках [6]

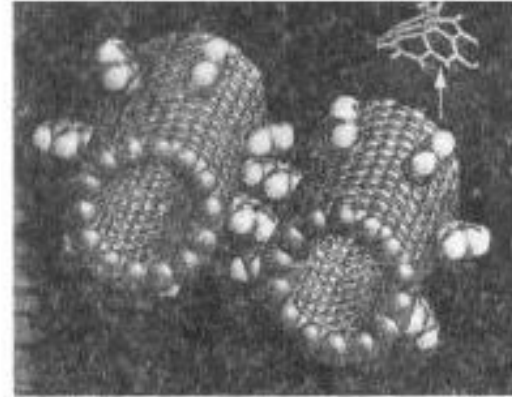


Рис. 5.33. Зубчатая передача на нанотрубках [8, 6]

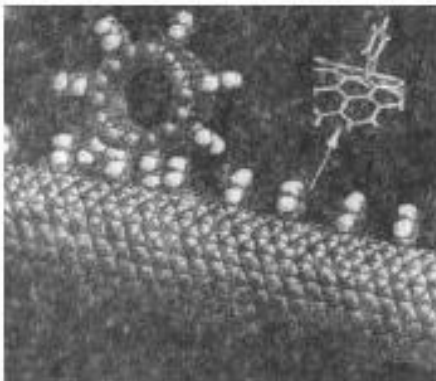
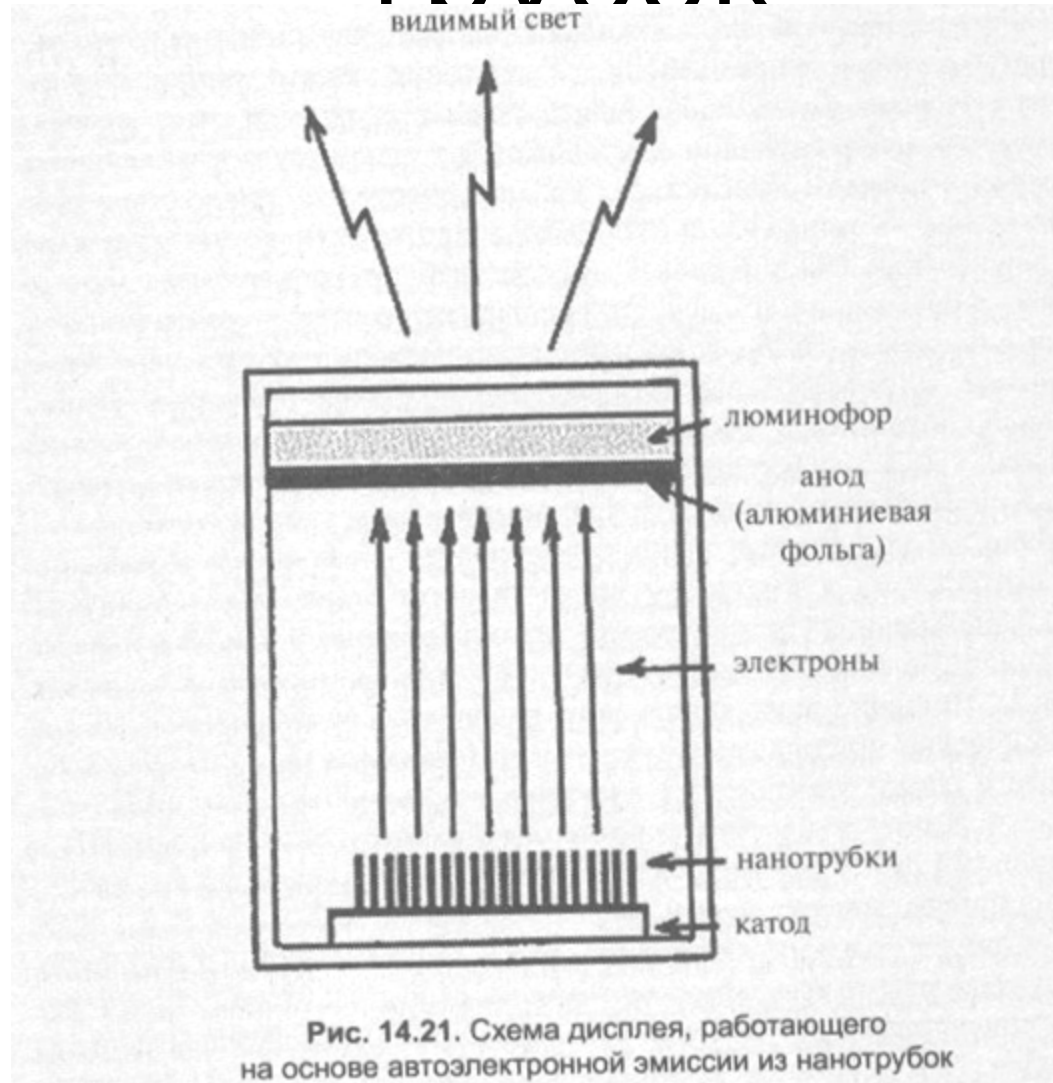


Рис. 5.34. Червяная передача на нанотрубках [8]



Рис. 5.37. Схема размещения однослойной нанотрубки на кантилере атомного силового микроскопа [8]

# Дисплеї на основі вуглецевих трубок



# Наношприцы

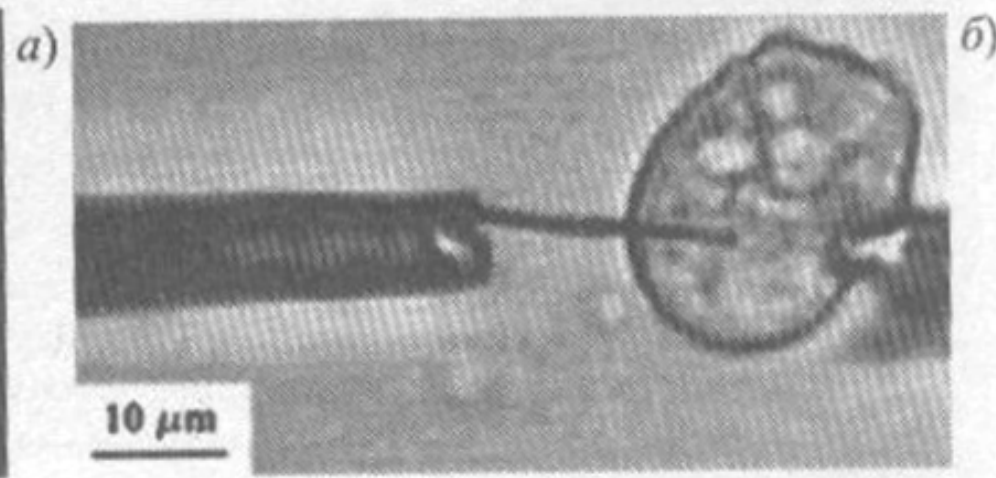
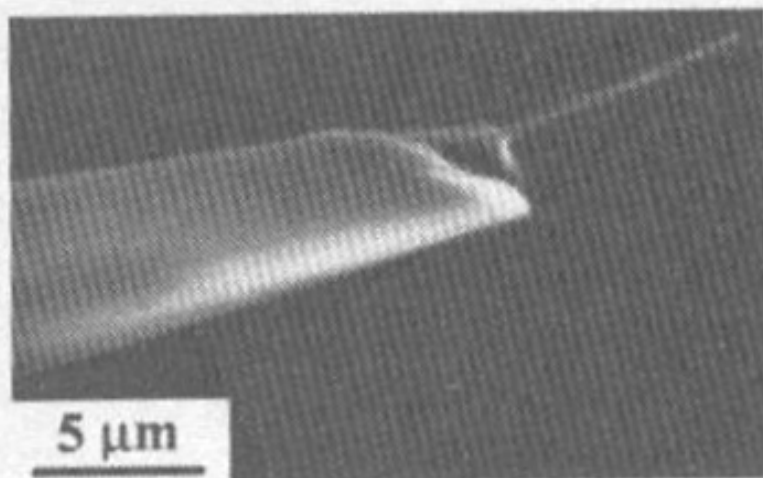


Рис. 14.22. (а) Пипетка с углеродной нанотрубкой на кончике. Соединение пипетки с трубкой герметично закреплено оптическим клеем. (б) Введение наношприца в клетку

# Легування фулеренів

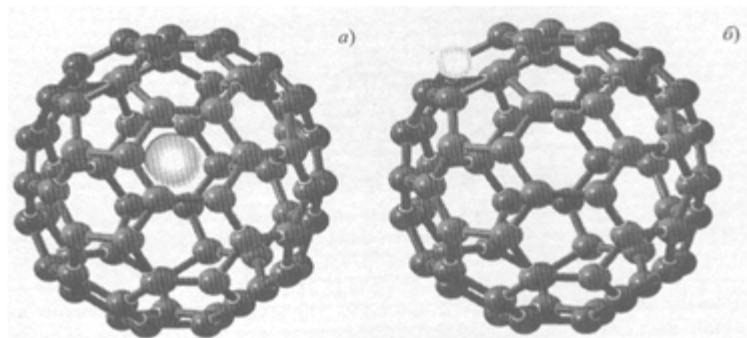


Рис. 15.2. Легирование фуллеренов: (а) внутреннее (эндофуллерены), (б) легирование замещением

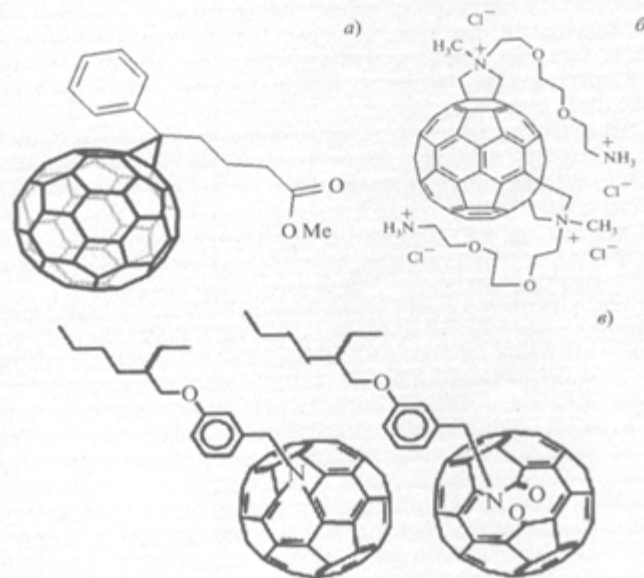


Рис. 15.3. Молекулярная структура производных  $C_{60}$ , которые используются в солнечных элементах: (а) метиловый эфир [6,6]-фенил- $C_{61}$ -бутиловой кислоты (PCBM); (б) транс-3  $C_{60}$ ; (в) азафуллероид; (г) кетолактамы

# Віруси схожі на фулерени

Вірус  
иммунодефицита  
человека (ВИЧ)



Вірус герпеса

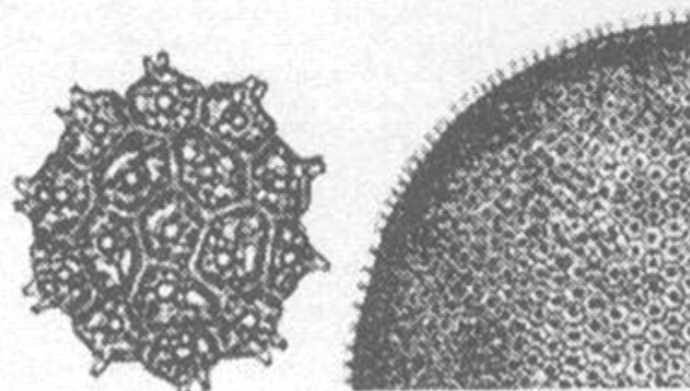
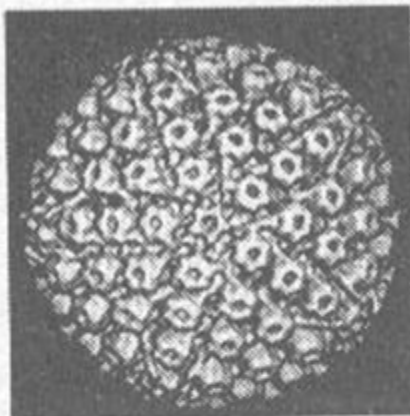


Рис. 10.7. Электронномикроскопические изображения вирусов с фуллереноподобной структурой

# Молекулярні прилади



Рис. 3.39. Переключающийся элемент на основе молекулы ротаксана

# Молекулярна пам'ять

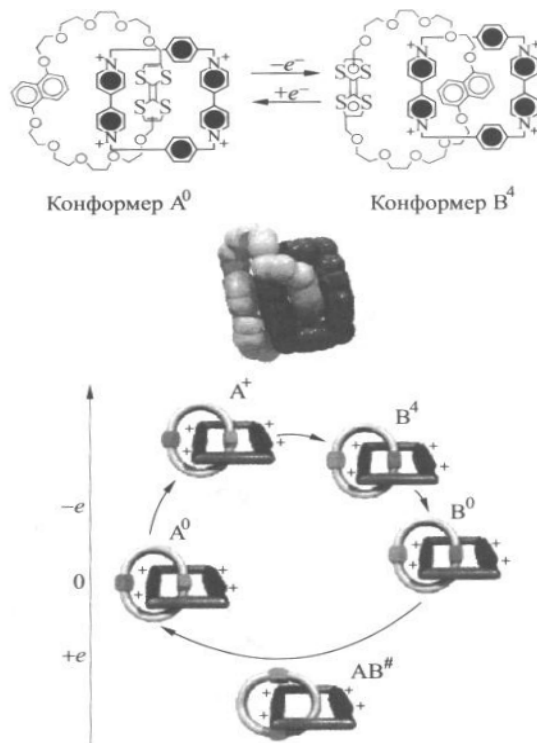


Рис. 3.36. Основные состояния молекул катенанов

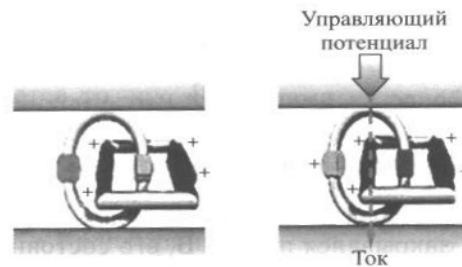


Рис. 3.37. Переключающийся элемент на основе молекулы катенана

# Молекулярний діод

