

**Плівки Ленгмюра-Блоджетт.
Нанотрубки та їх властивості.**

Самозборка.

Самозборка – це процес адсорбції та специфічного розташування молекул на твердій поверхні. Його рушійною силою є хемосорбція, яка проявляється в високоенергетичних реакціях між адсорбантом та адсорбуючою поверхнею.

Розділяють 3 основні функціональні групи – прикріплюючі, проміжні, функціональні.

Прикріплюючі: $RSiX_3 \left[(R = CH_3, C_2H_5, \dots), (X = CH_3, CH_2 - OH, Cl, \dots) \right]$

Тиол (RSH)

Проміжні: CH_2, C_2H_4, C_3H_6

Поверхневі функціональні: NH_2, F, Cl, J

Технологія створення нанорисунку

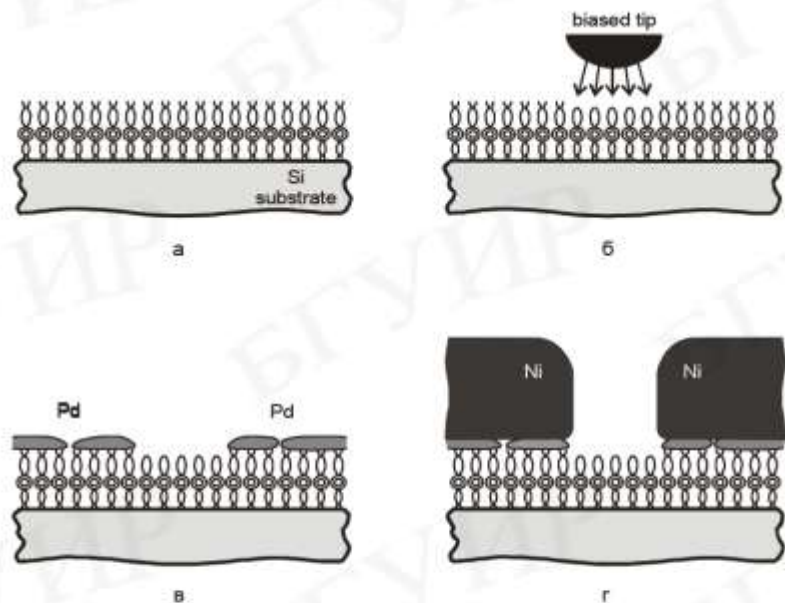
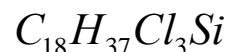


Рис. 4.1. Формирование наноразмерного рисунка с использованием самоупорядочивающейся мономолекулярной пленки [1]:
а – осаждение мономолекулярного слоя; б – создание рисунка зондом сканирующего туннельного микроскопа; в – осаждение палладиевого катализатора; г – осаждение никеля

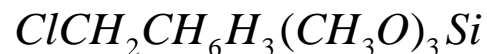
Октадецилтрихлоросилан



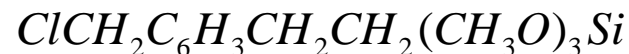
Фенетилтриметоксисилан



Хлорметилфенилтриметоксисилан



Хлорметилфенетилтриметоксисилан



Плівки Ленгмюра-Блоджетт



Термин пленки Лэнгмюра–Блоджетт (LB-пленки) обозначает моно- или многослойные пленки, перенесенные с границы раздела вода-воздух (в общем случае жидкость–воздух) на твердую подложку. По своим движущим силам процесс формирования таких пленок подчиняется закономерностям самосборки. Молекулярная пленка на границе раздела вода–воздух называется Лэнгмюровской пленкой.

Первые систематические исследования монослоев из амфифильных молекул на границе раздела вода – воздух были выполнены Лэнгмюром в 1917 году. Итогом исследований мономолекулярных (толщиной в одну молекулу) слоев на поверхности жидкости стало присуждение Лэнгмюру в 1932 году Нобелевской премии по химии.



Первое исследование по осаждению многослойной пленки из длинных цепочек карбоновой кислоты на твердую подложку было проведено Кэтрин Бэрр Блоджетт в 1935 году. Метод физического осаждения LB-пленок при погружении (или подъеме) в жидкость, на поверхности которой находится органическая пленка, называется LB-осаждением. Ею же было изготовлено «невидимое стекло» имеющее пленку из 44 слоев стеарата бария.

Головна ідея методу LB

Вещества, монослои которых переносятся LB-технологией и взаимодействуют с водой (растворяются в воде), смачиваются или набухают, называются гидрофильными.

Вещества, которые не взаимодействуют с водой (не растворяются), не смачиваются и не набухают, называются гидрофобными.

Молекулы амфифильных веществ, используемых в LB-технологии, имеют особую структуру: один конец молекулы является гидрофильным и поэтому оказывается предпочтительно погруженным в воду, а другой конец является гидрофобным и поэтому предпочтительно находится в воздухе (или в неполярном растворителе).

Классический пример амфифильного вещества – стеариновая кислота ($C_{17}H_{35}CO_2H$), в которой длинный гидрокарбонатный —хвост ($C_{17}H_{35}-$) является гидрофобным, а основная (головная) карбоксильная группа ($-CO_2H$) является гидрофильной.

Так как амфифили имеют один гидрофильный конец, а другой конец гидрофобный, то они предпочитают располагаться на границах раздела, таких как воздух-вода или масло-вода, т.е. ведет себя подобно типичным поверхностно-активным веществам.

Отримання багатосарових плівок

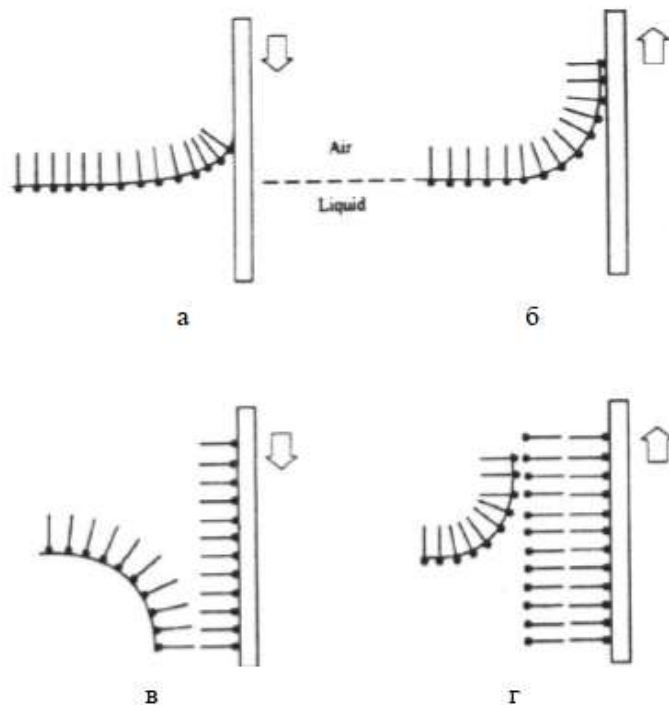


Рис. 8.31. Схема формування багато-
слойних плінок LB-технологією [1]
а – перше поглиблення; б – перший підйом;
в – друге поглиблення; г – другий підйом

Если процесс осаждения начинается с гидрофильной подложки, она становится гидрофобной после осаждения первого монослоя, и таким образом второй монослой будет перенесен при погружении.

Этот вариант является наиболее общим способом формирования многослойных пленок для амфифильных молекул, в которых головные части являются сильно гидрофильными ($-\text{COOH}$, $-\text{PO}_3\text{H}_2$ и др.), а хвостовые части представляют собой алкильные цепочки.

Можливі комбінації шарів

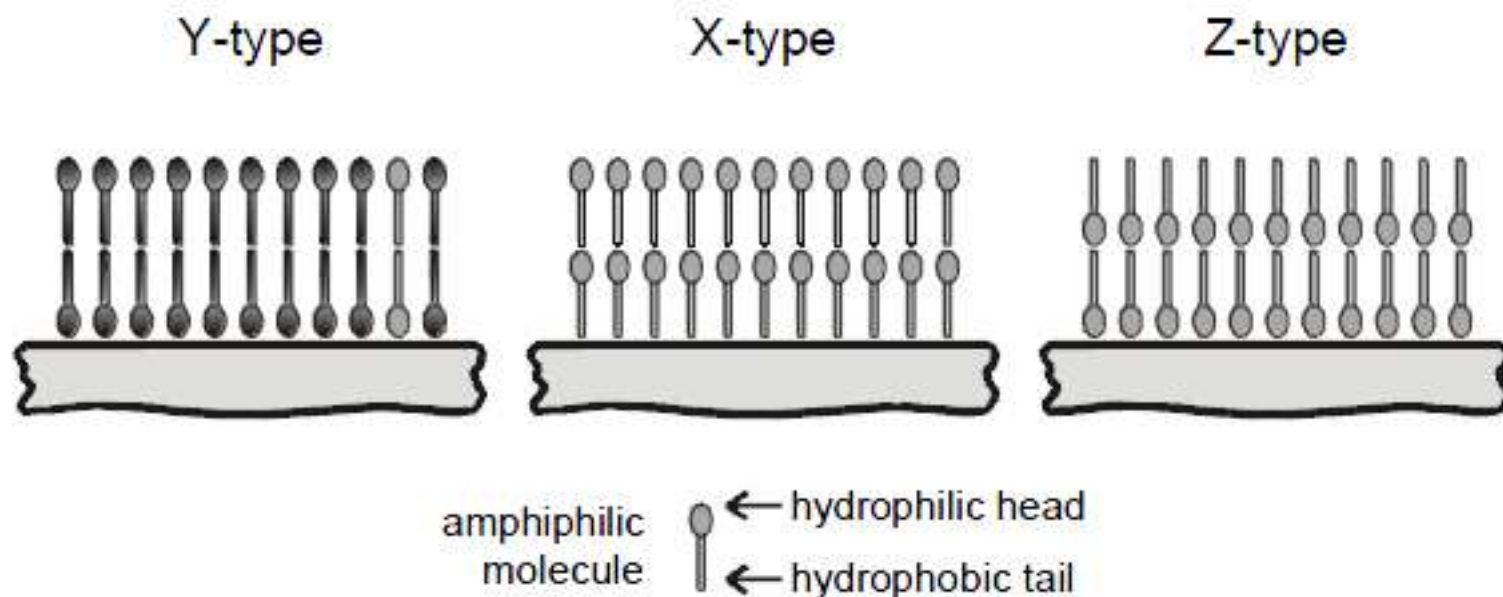


Рис. 8.32. Схематическое изображение пленок Y-, X- и Z-типа [1]

Традиційна установка для нанесення плівок LB

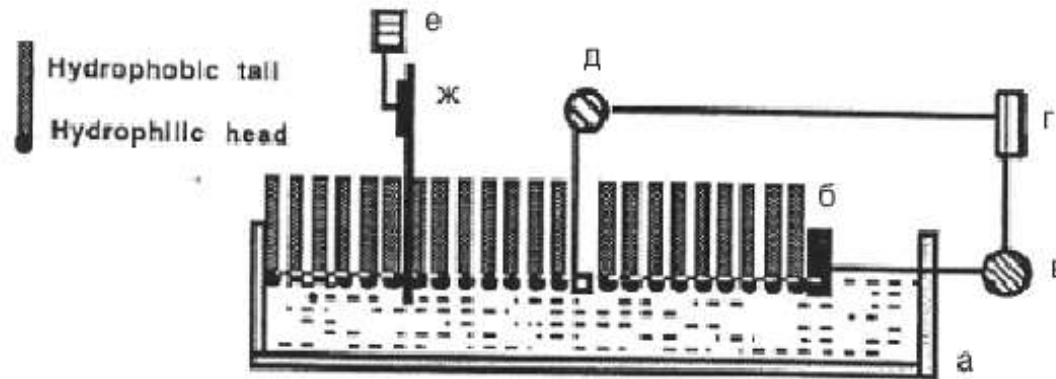


Рис. 8.33. Схема устройства для осаждения пленок Лэнгмюра–Блоджетт [1]

На рисунку представлена схема устройства для осаждения LB-пленок. На этой схеме: а – ванна, обычно изготавливаемая из тефлона; б – движущийся барьер, позволяющий оказывать контролируемое давление на монослой; в -мотор, который двигает барьер; г – измерительный прибор, позволяющий контролировать давление на поверхности воды; д – балансирующее устройство; е – мотор с редуктором (коробкой скоростей); ж – твердая подложка. Были разработаны и другие установки с двумя и более ваннами для осаждения.

Метод Ленгмюра-Шайфера

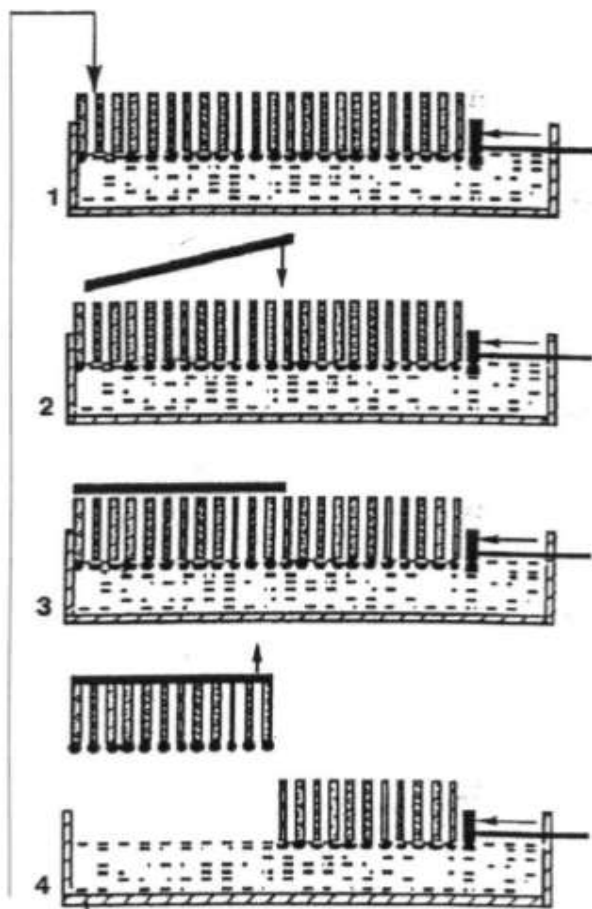


Рис. 8.34. Формирование пленок методом Ленгмюра-Шайфера

Другой метод создания LB-многослойных структур – горизонтальный метод подъема, который был разработан Лэнгмюром и Шайфером в 1938 году. Метод Шайфера полезен для осаждения очень твердых (жестких) пленок. В этом методе сначала формируется сжатый монослой на границе раздела вода–воздух (1, рис. 8.34). Затем плоская подложка располагается горизонтально на пленку монослоя (2, 3, рис. 8.34). Когда эта подложка поднимается вверх и отделяется от поверхности воды, монослой переносится на подложку (4, рис. 8.34), сохраняя, теоретически, такое же направление молекул (X-тип).

Вуглець – основа життя та сировина для нанотехнологій

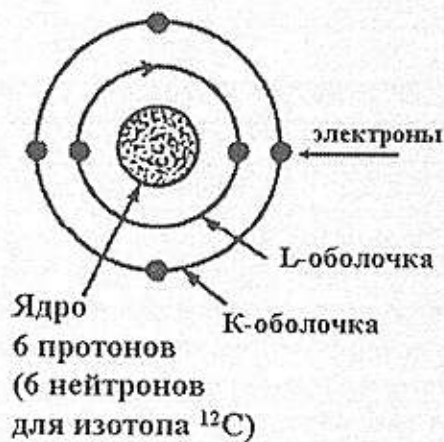


Рис. 3.3. Схематическе изображение электронной структуры атома углерода в основном состоянии

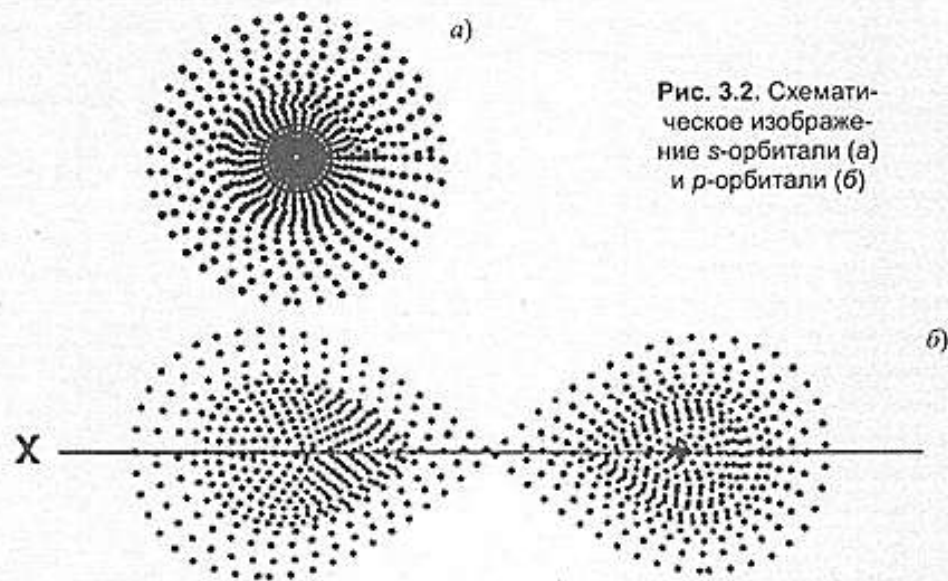
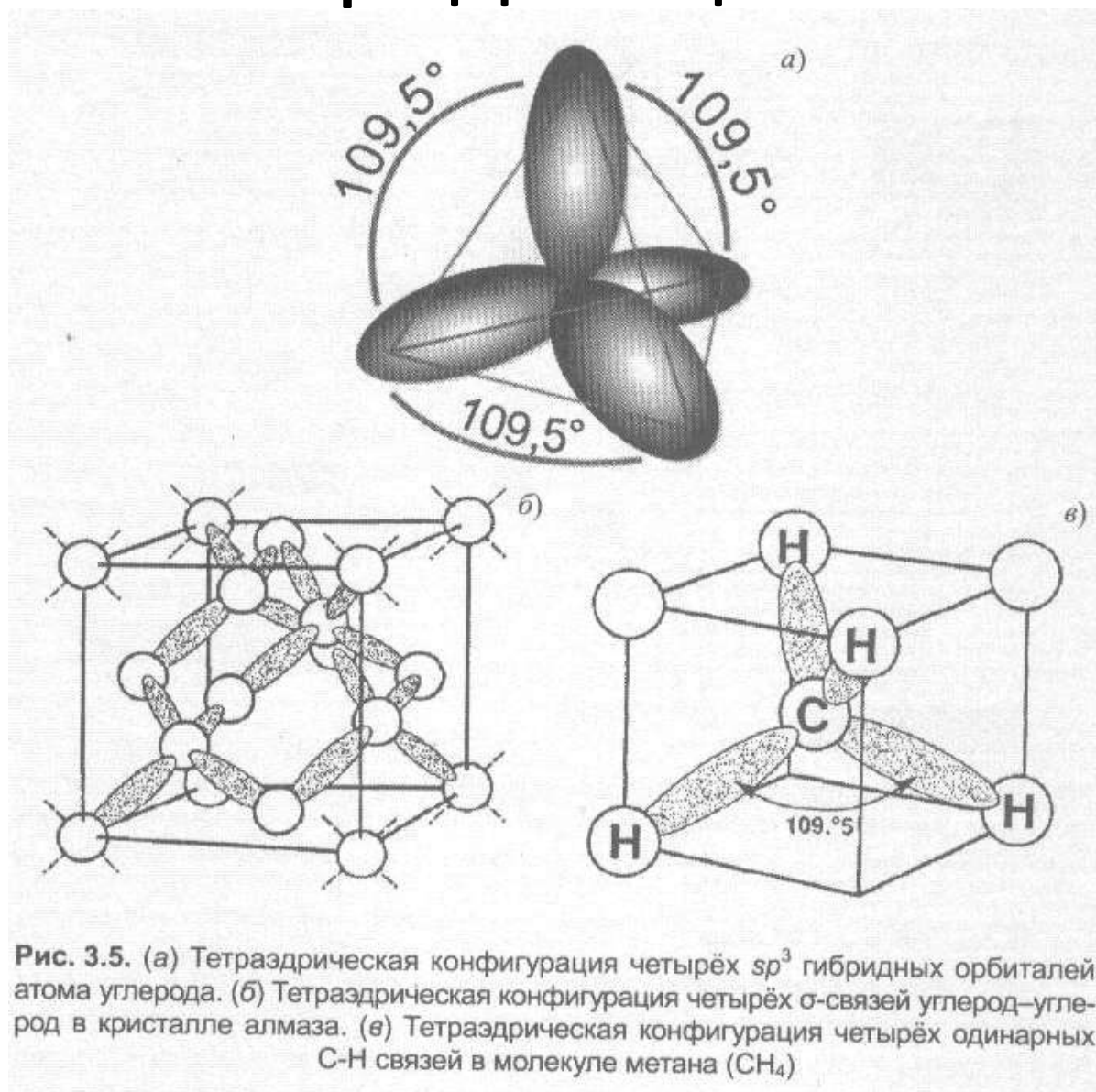
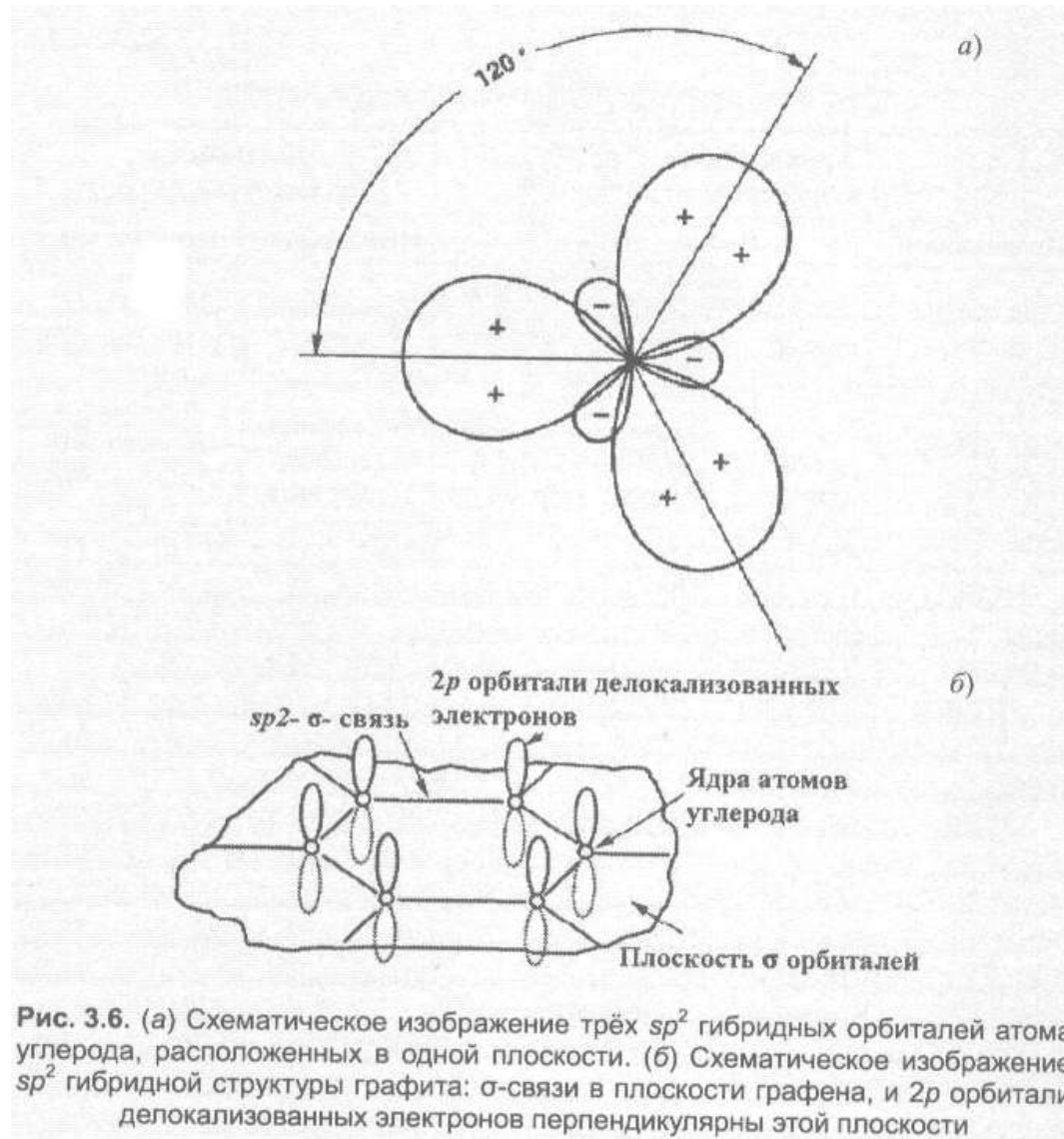


Рис. 3.2. Схематическое изображение s-орбитали (а) и p-орбитали (б)

Гібридизація sp^3



Гібридизація sp^2



Гібридизація sp^1

Алкени, Карбіни

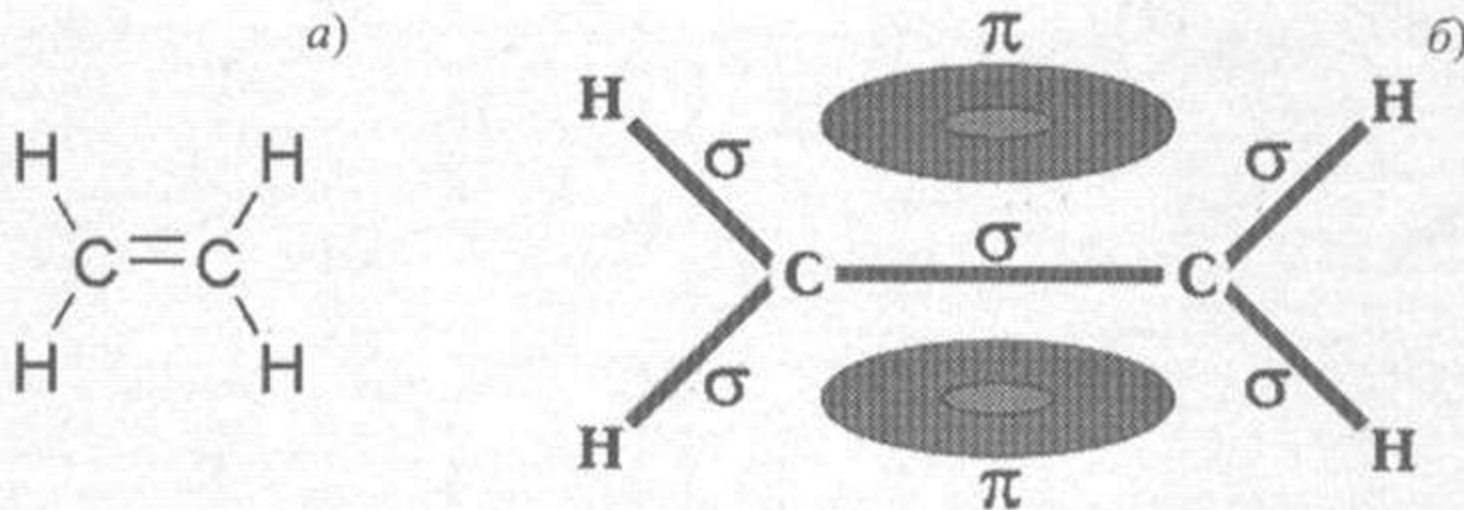
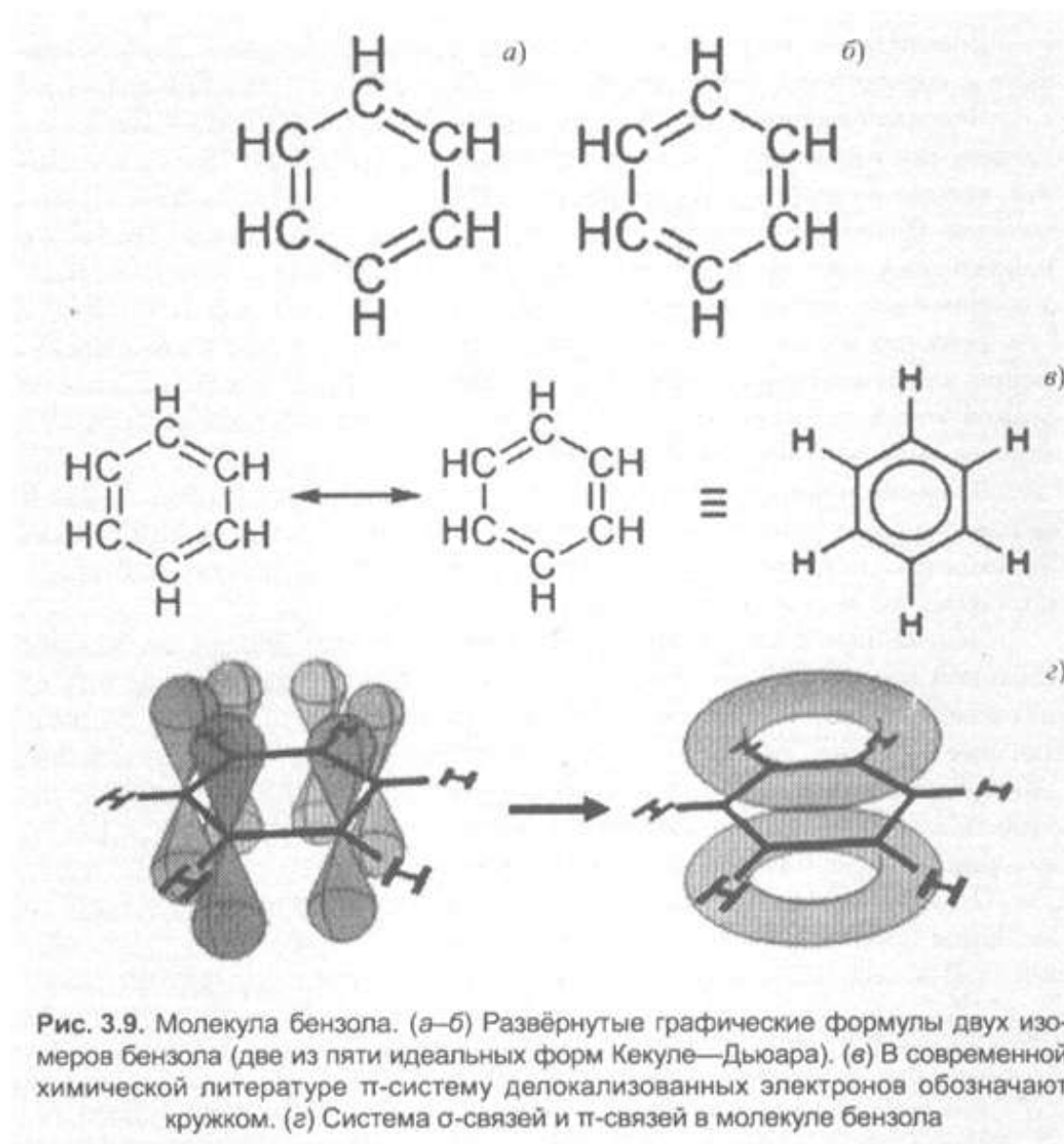


Рис. 3.13. Молекула етилена. (а) Развёрнутая графическая формула.
(б) Система σ - и π -связей

Бензоли



Бджолині соти

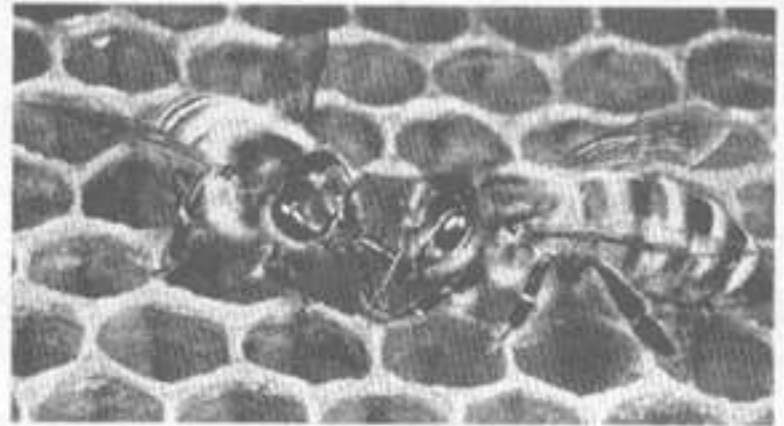
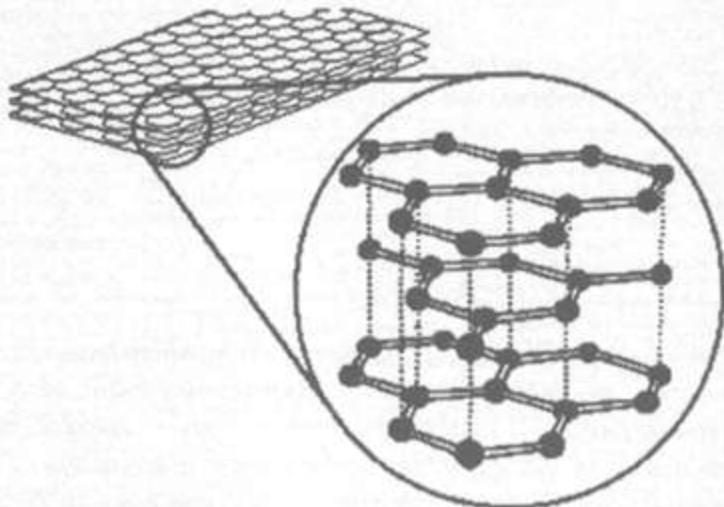


Рис. 3.8. Пчелиные соты — одна из самых совершенных конструкций на нашей планете

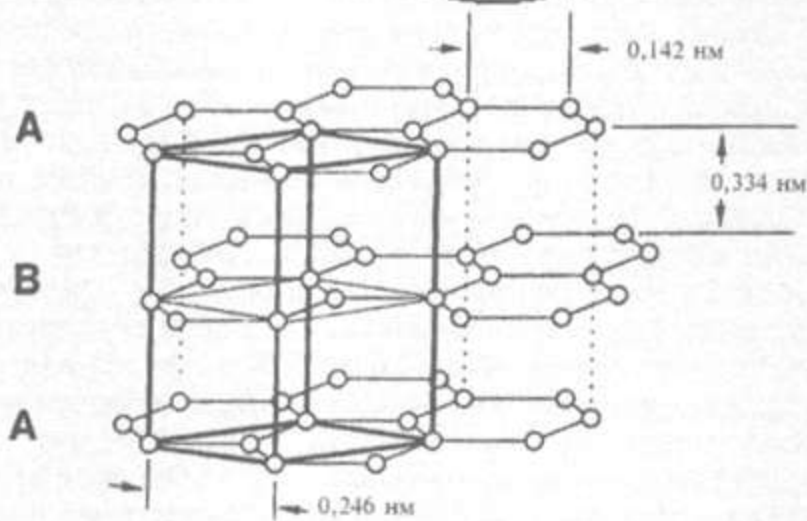


Рис. 3.7. Кристаллическая структура графита

Арены

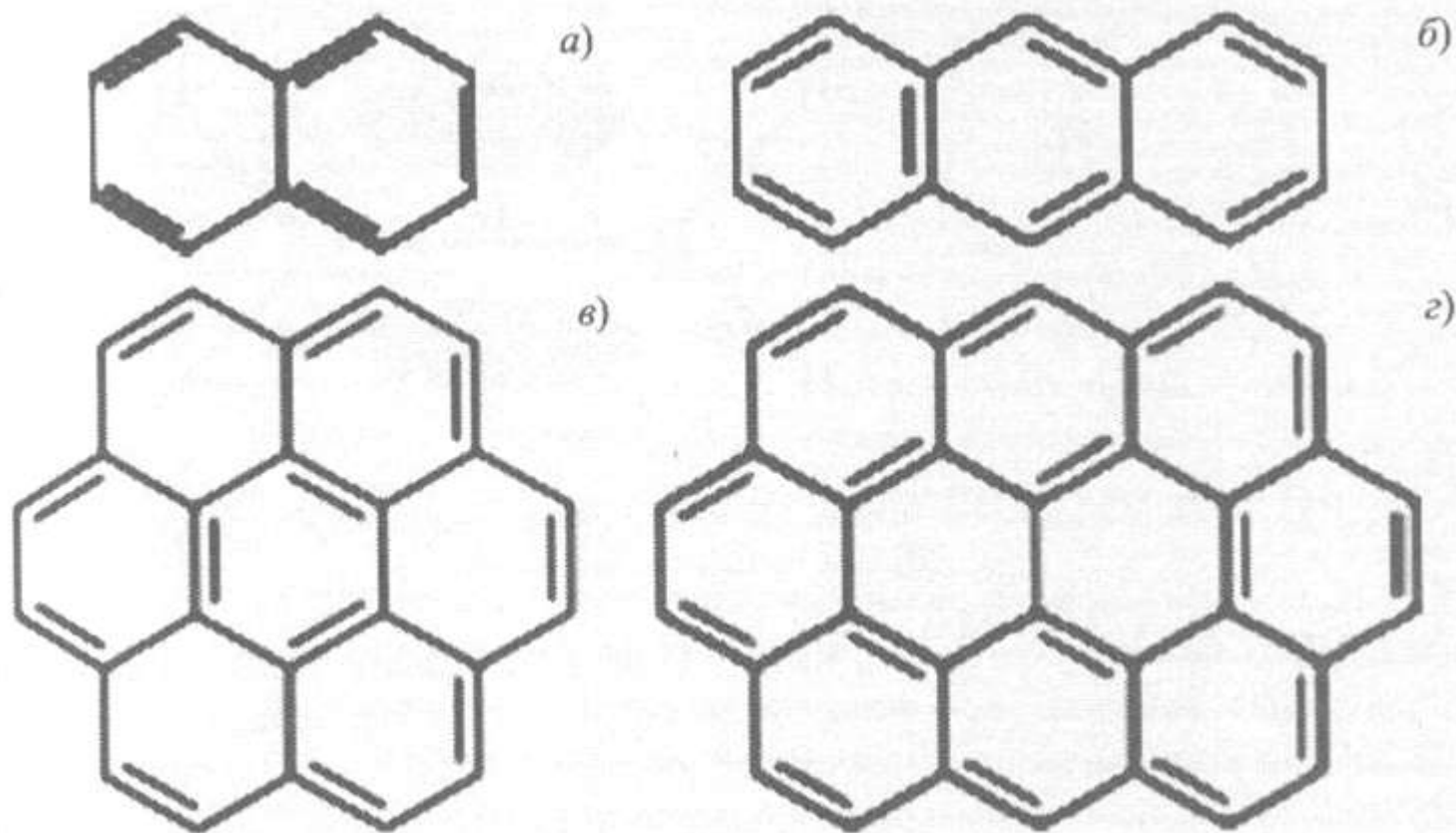


Рис. 3.11. Краткие графические формулы некоторых аренов. Вершинами шестиугольников обозначены пары С-Н. (а) нафталин, (б) антрацен, (в) коронен, (г) овален

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

Молекули BUCKY-BOWL

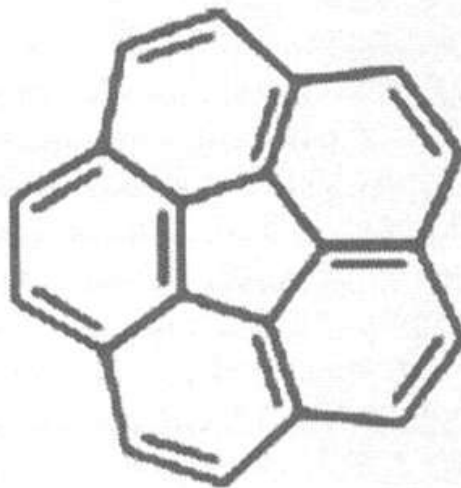
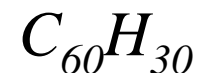
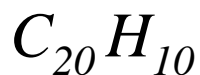


Рис. 3.12. Краткая графическая формула кораннулена, $C_{20}H_{10}$



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

Молекулы BUCKY-BALL

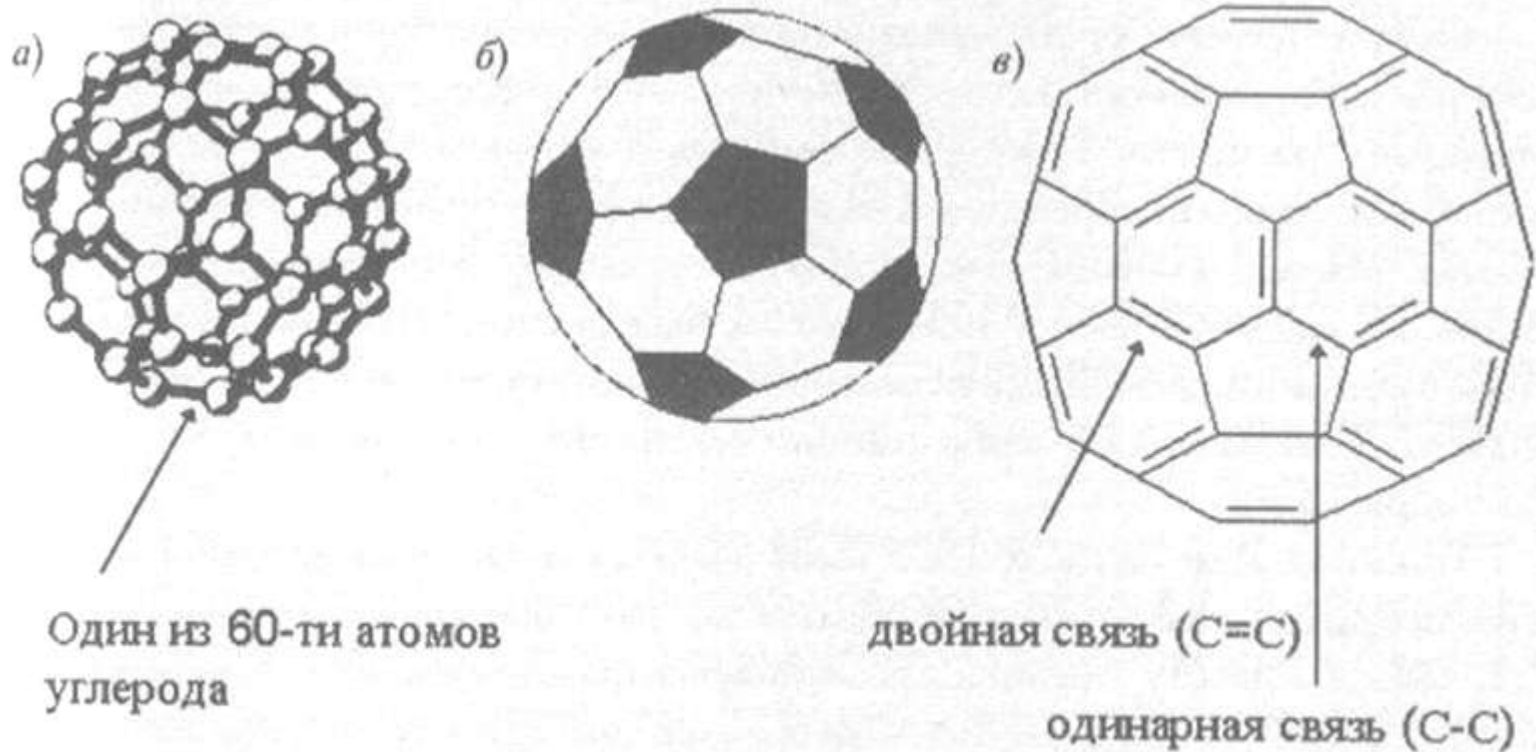


Рис. 4.1. Молекула C_{60} (а) и футбольный мяч (б) в форме усечённого икосаэдра; (в) химические связи между атомами углерода в молекуле C_{60}

Відкриття фулерену C_{60} (1985 р.)

Гарольд Крото – англійський відомий вчений в області мікрохвильової спектроскопії та радіоастрономії (працював в університеті Сассекс, Англія)

Річард Смолі – американський вчений в області плазменних методів формування кластерів тугоплавких металів (університет Райса в Хьюстоні)

Роберт Кёрл – американський вчений (університет Райса в Хьюстоні), який вивчав формування кластерів напівпровідників.

Метод Річарда Смолі

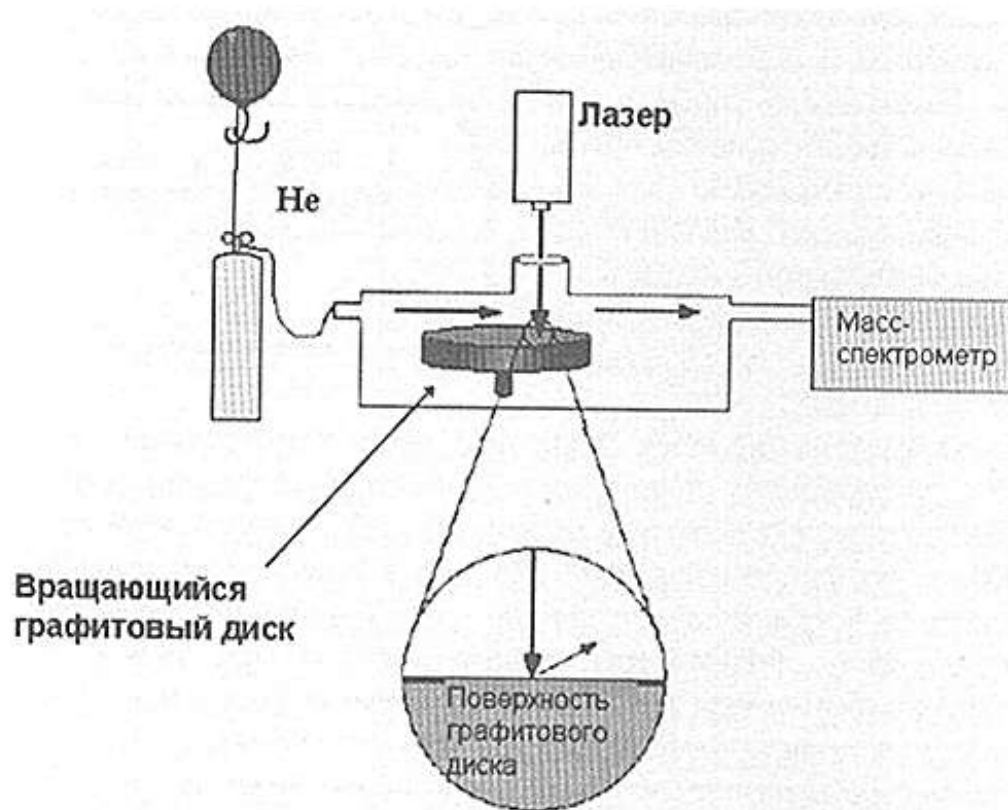


Рис. 8.2. Источник для получения кластерных пучков тугоплавких элементов методом лазерного испарения [21]. В углеродных экспериментах использовалась мишень в виде медленно вращающегося графитового диска, что обеспечивало высокое качество облучаемой поверхности. Импульс испаряющего лазерного излучения 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

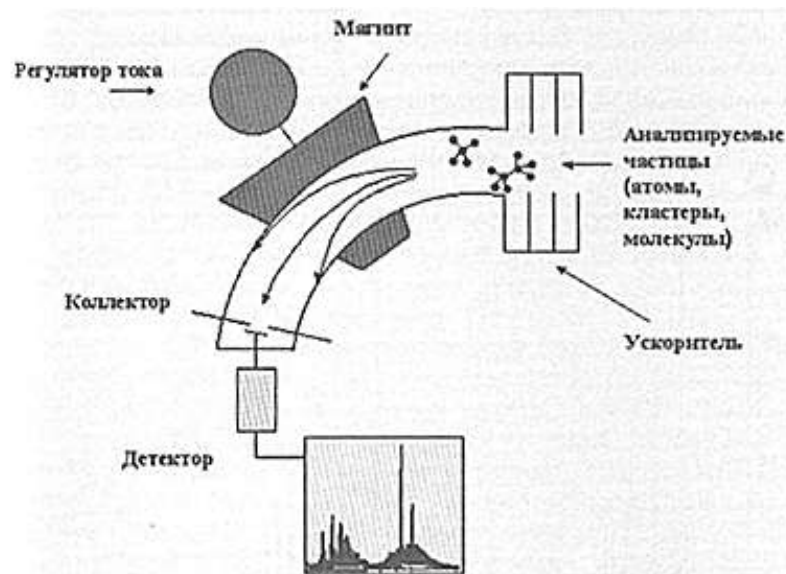


Рис. 8.3. Принципиальная схема масс-спектрометра

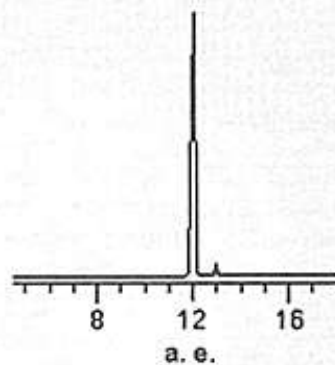


Рис. 8.4. Масс-спектр атомов углерода

Фуллереновый ряд

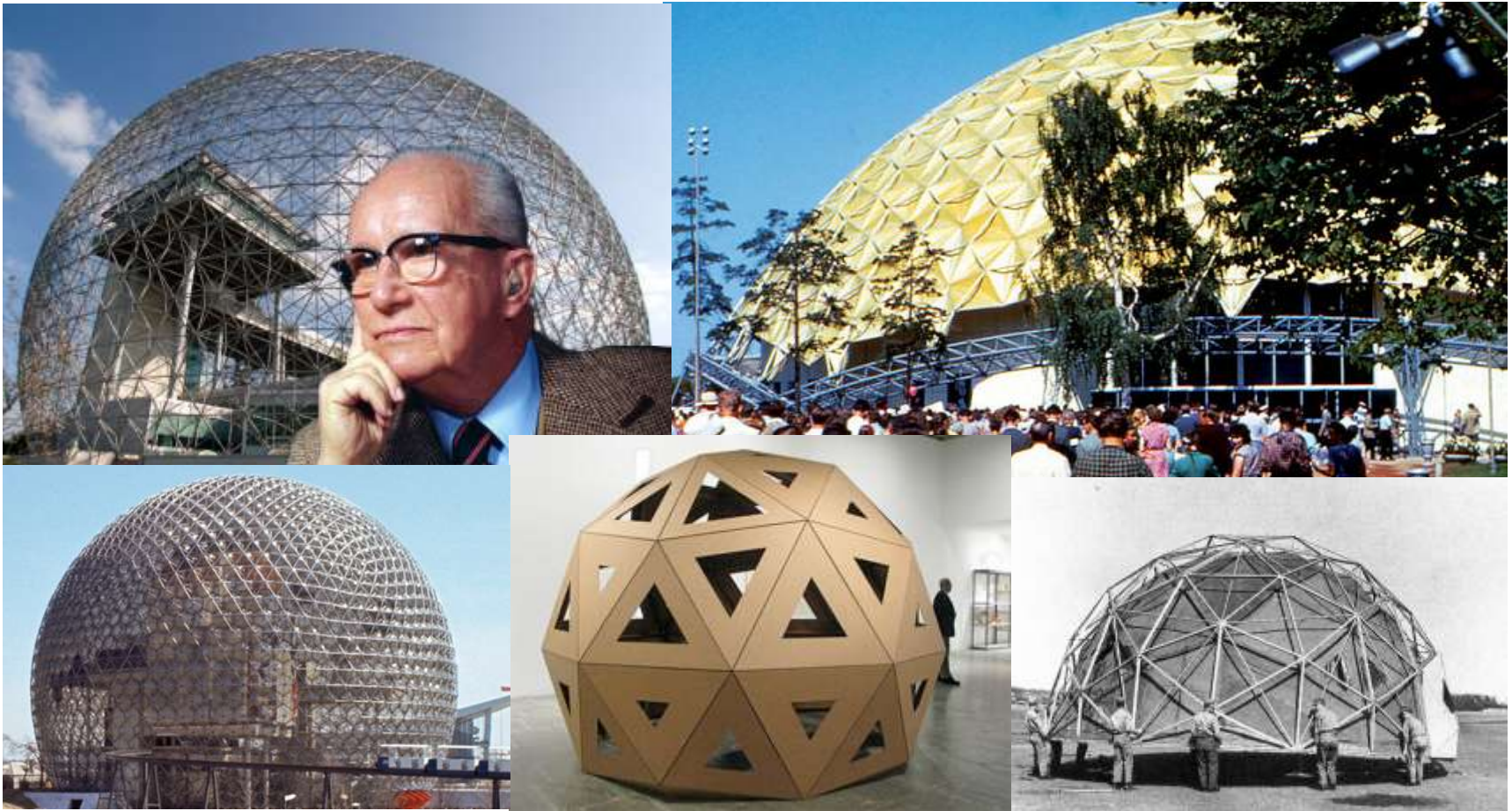
Таблица 12.1

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

Молекула C_n	Группа симметрии	d , Å
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
...

Бакмінстер Фулер

Buckminster Fuller was a world-renowned architect, math-obsessed designer, and affable weirdo. He died in 1983, but Fuller is still remembered fondly today for his geodesic domes and his three-wheeled cars. Despite extensive historical interest in the man, his FBI file has never been made public. Until now.



Різновиди невеликих молекул фулеренів

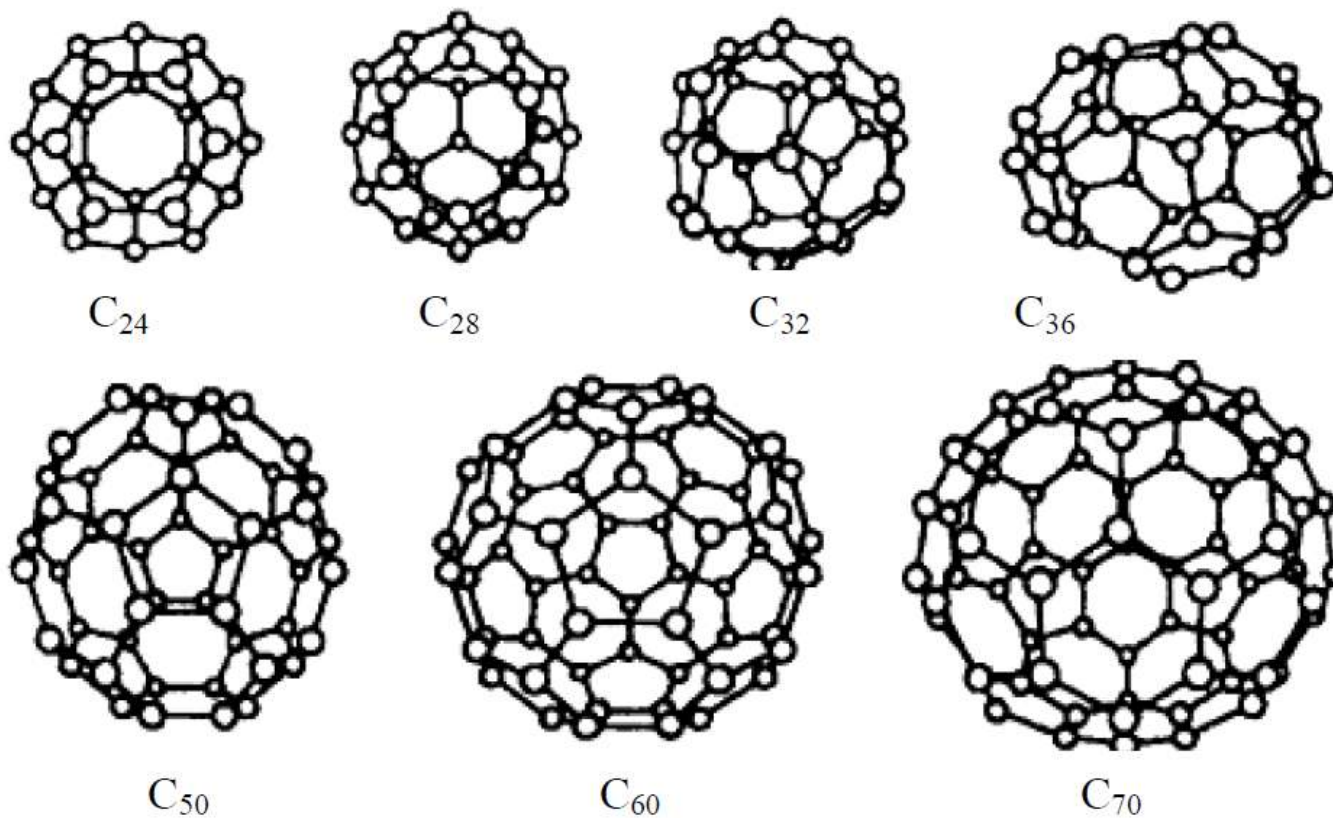
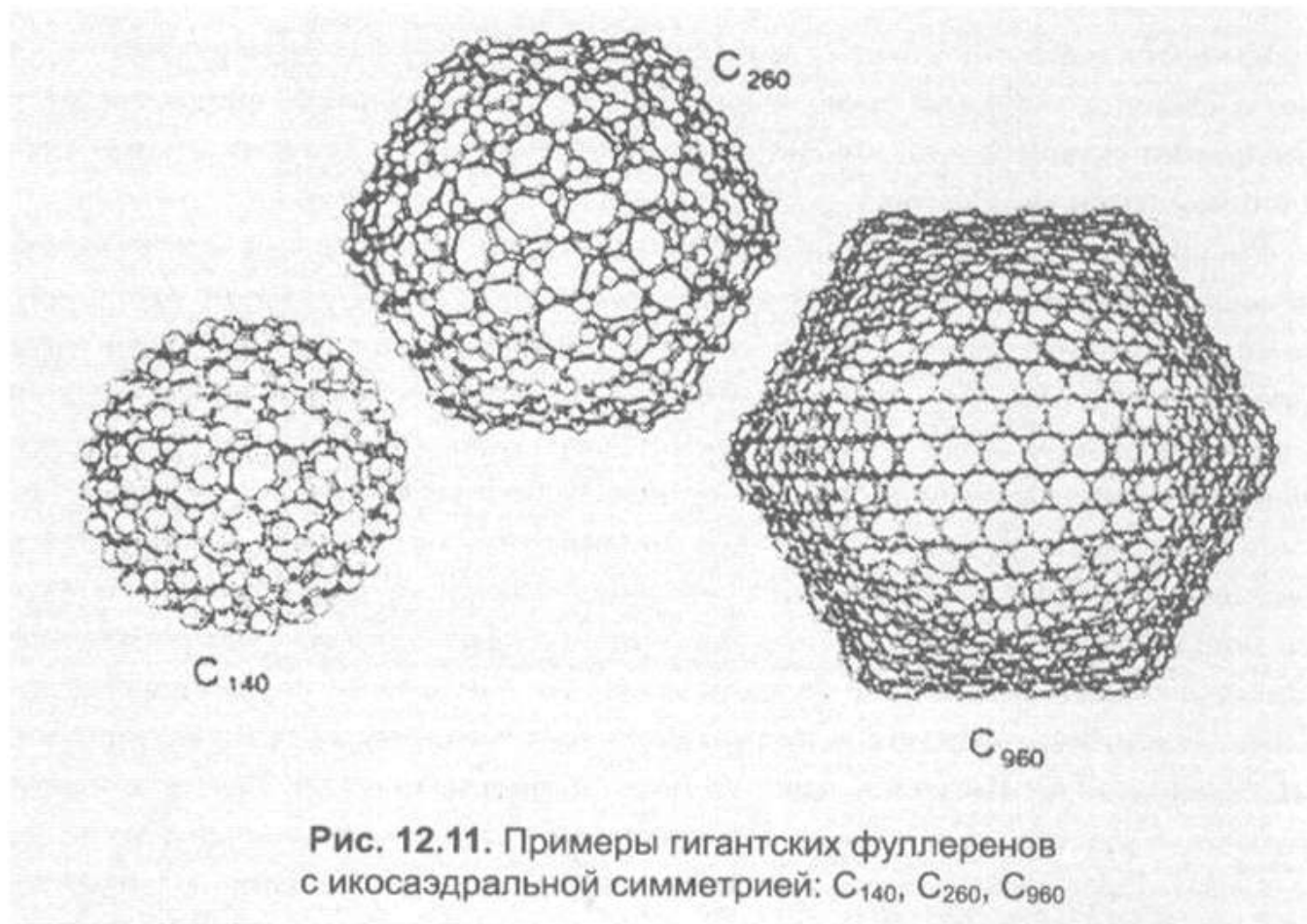


Рис. 5.6. Разновидности фуллеренов

Гігантські молекули фулеренів



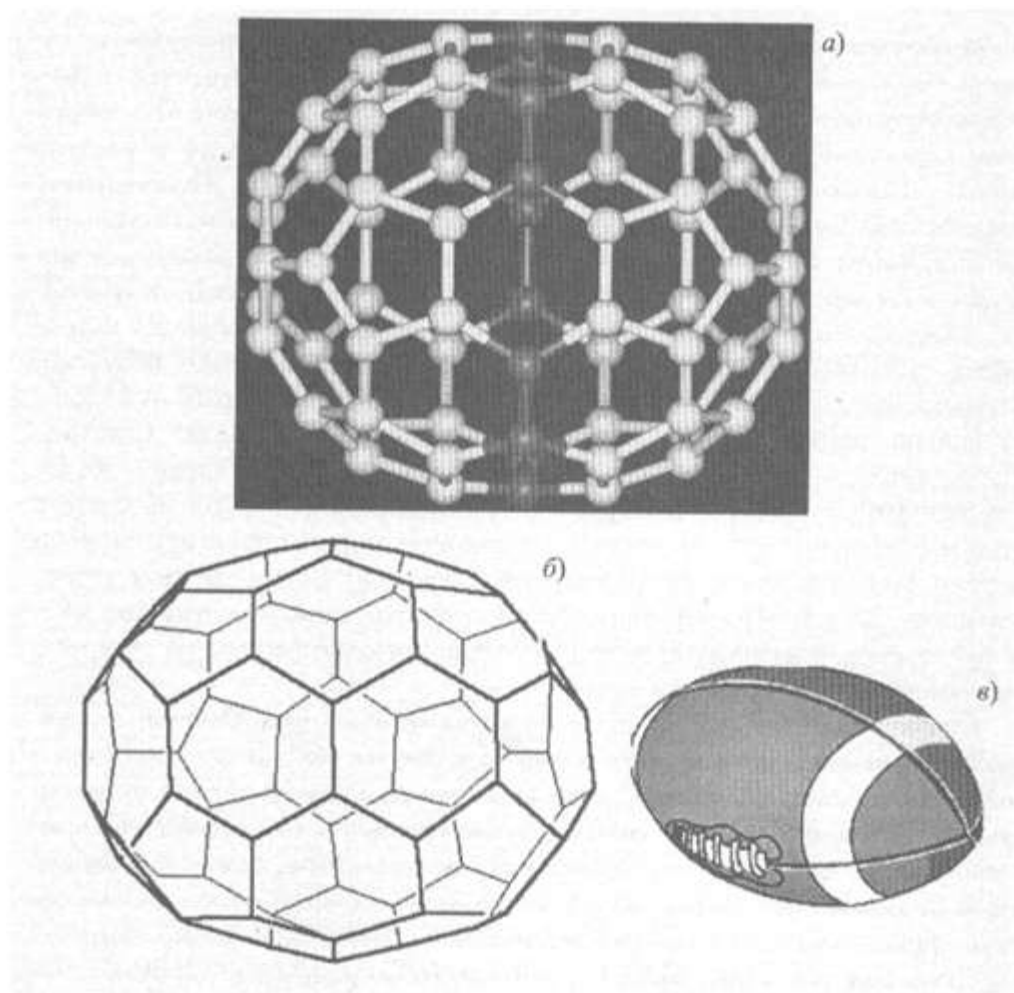
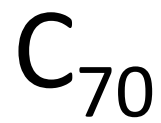
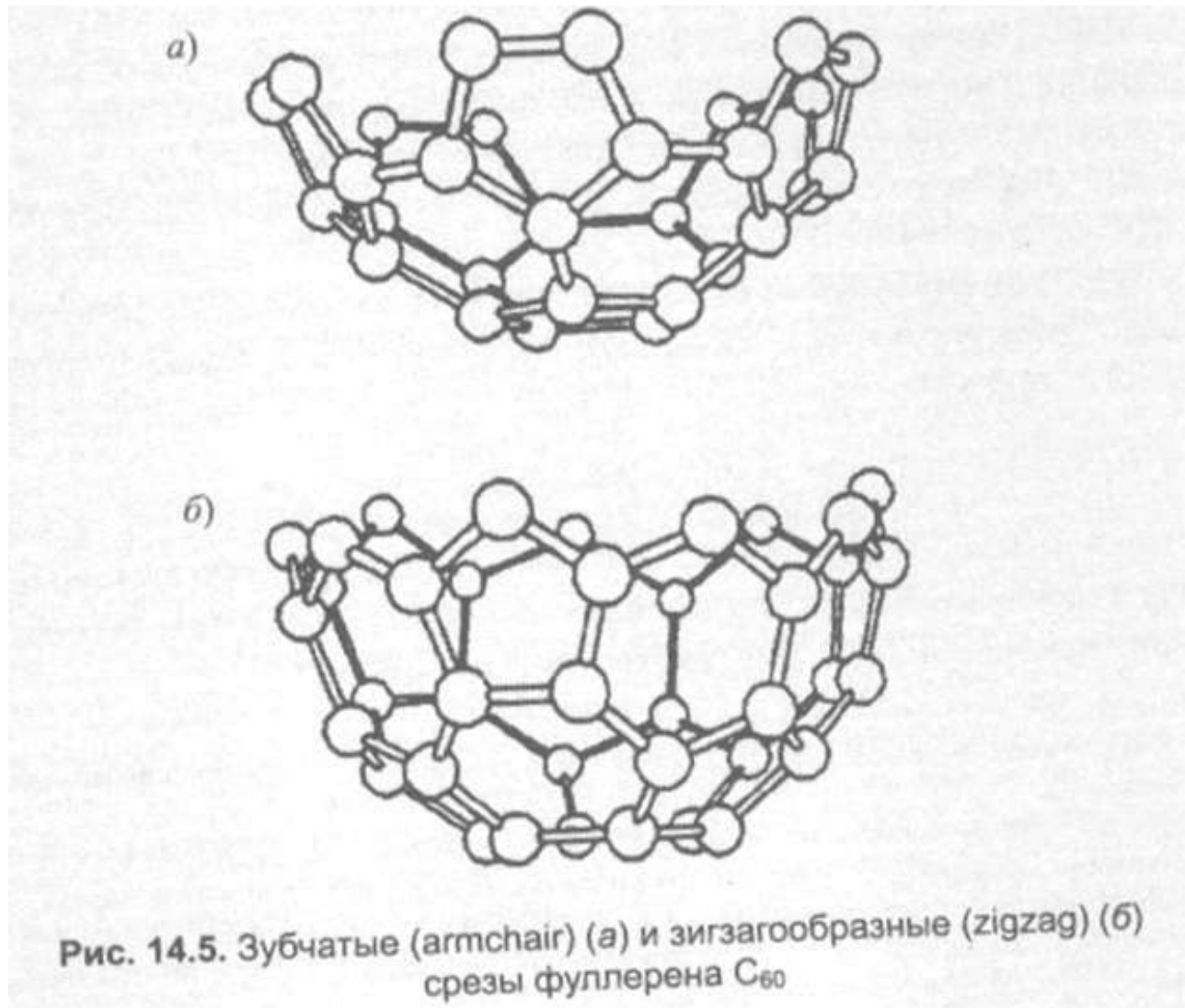
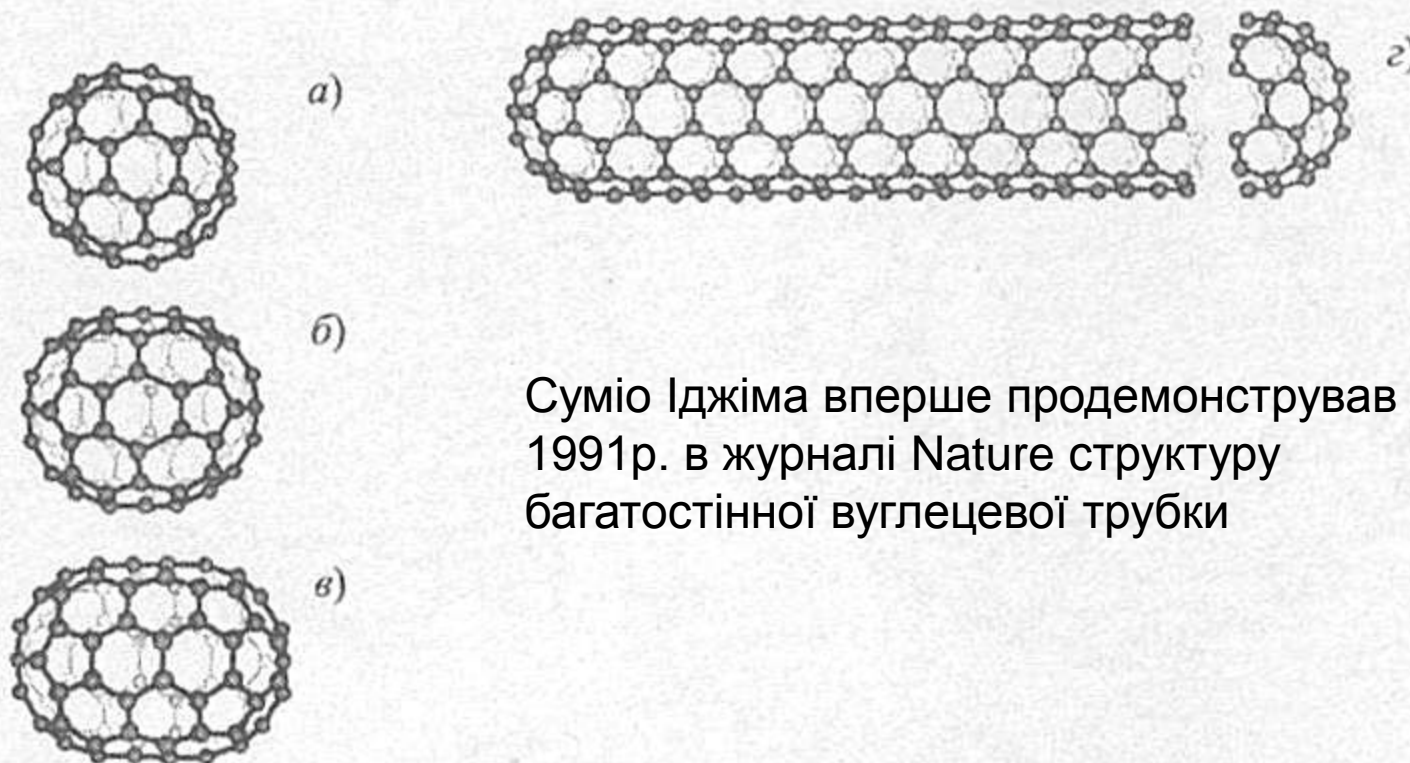


Рис. 12.10. Структура молекулы C_{70} : две полусферы C_{30} разделяются кольцом из десяти дополнительных атомов (а), составляя многогранник с 12 пятиугольными и 25 шестиугольными гранями (б). Из-за вытянутой, близкой к эллипсоиду, формы молекулы C_{70} она получила название «регбибол» (в)

Перерізи молекули C_{60}



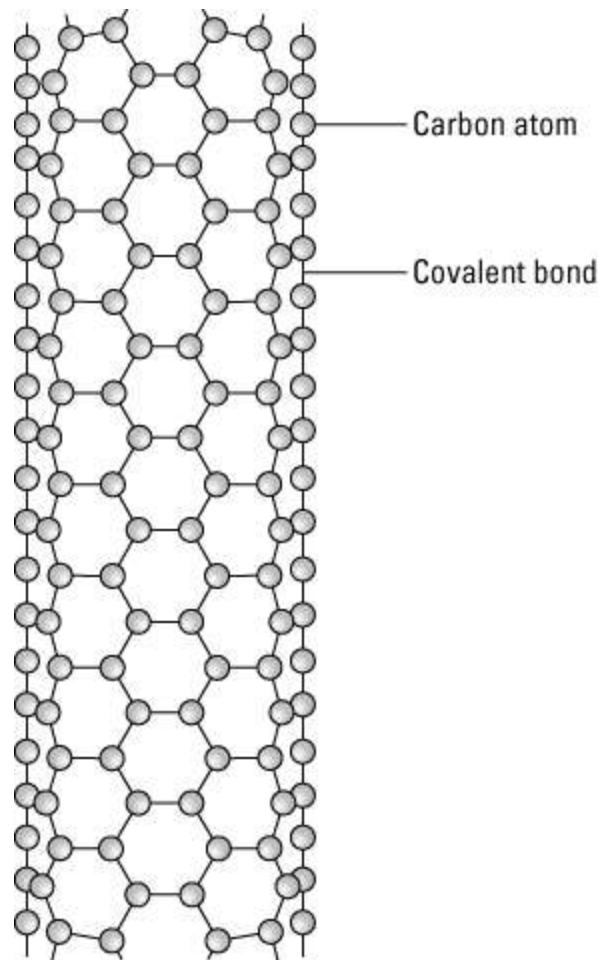
Відкриття вуглецевих нанотрубок



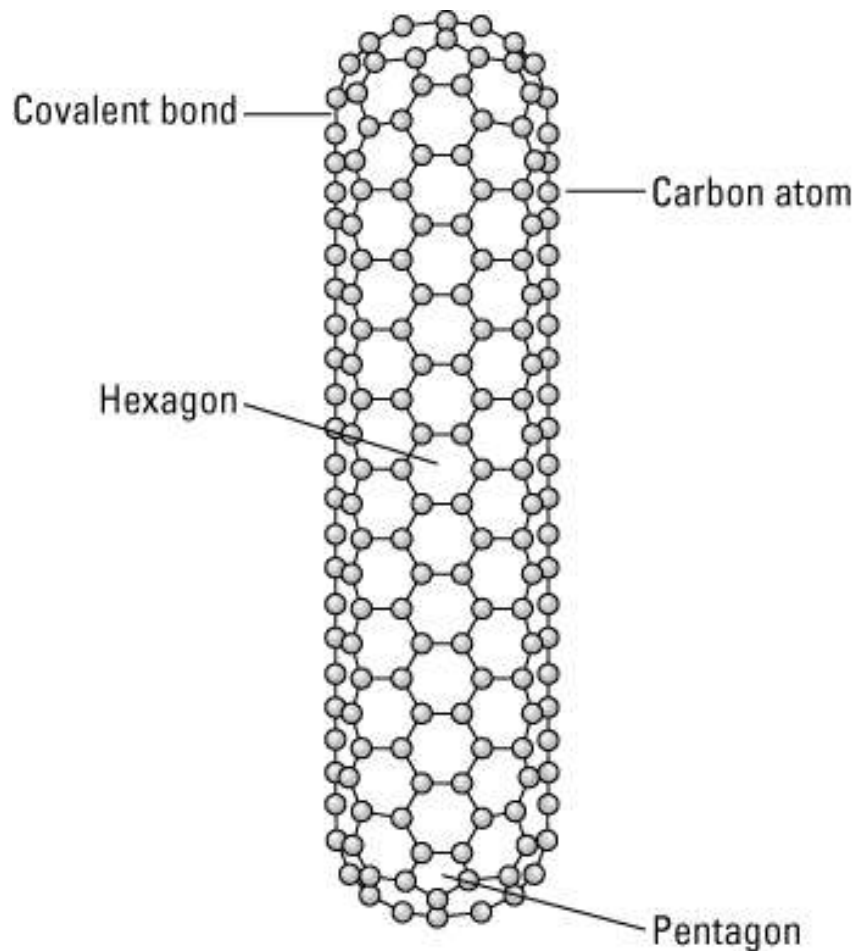
Сумію Іджіма вперше продемонстрував в 1991р. в журналі Nature структуру багатостінної вуглецевої трубки

Рис. 12.13. Превращение бакминстерфуллерепа в углеродную нанотрубку с помощью последовательного добавления экваториальных колец из десяти атомов углерода: (а) C_{60} , (б) C_{70} , (в) C_{80} , (г) углеродная нанотрубка $C_{1000000}$

Одностінні вуглецеві нанотрубки (CNT)



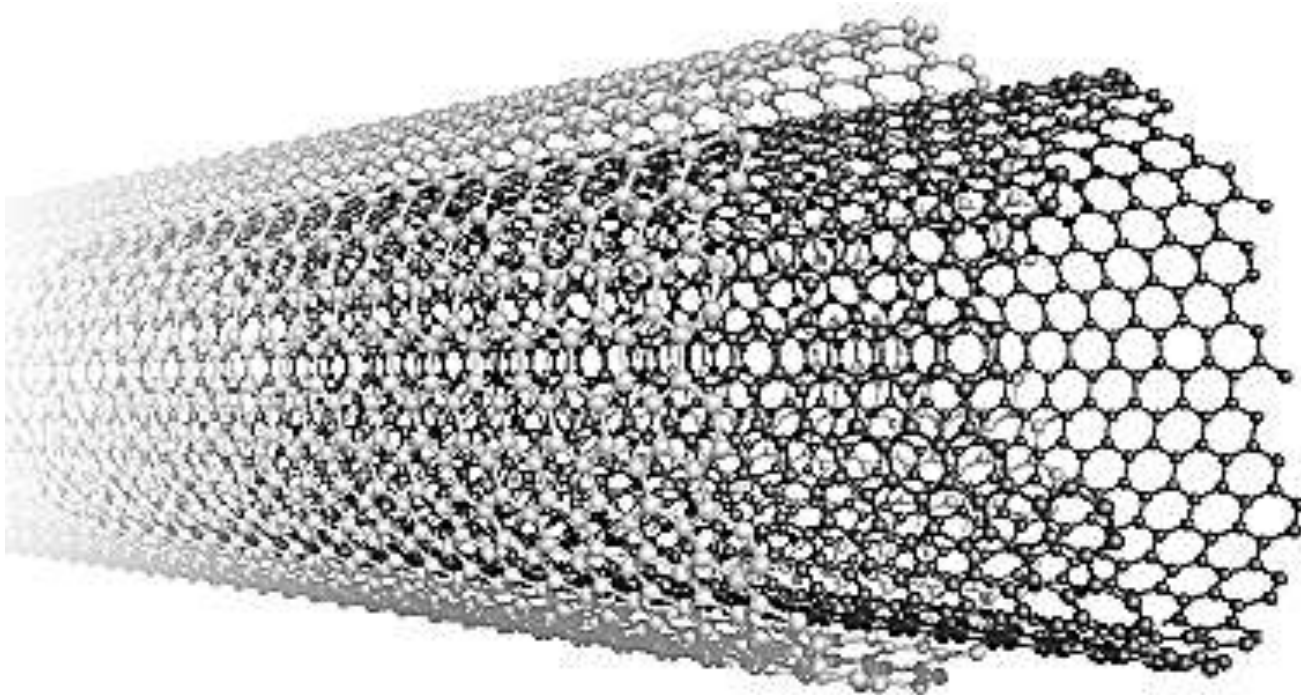
Циліндрична нанотрубка з відкритими кінцями



Циліндрична нанотрубка з закритими кінцями

Одностінні та багатостінні CNT

Carbon nanotubes can occur as multiple concentric cylinders of carbon atoms, called multi-walled carbon nanotubes (MWCTs) and shown in the following figure. Logically enough, carbon nanotubes that have only one cylinder are called single-walled carbon nanotubes (SWCTs). Both MWCT and SWCT are used to strengthen composite materials.



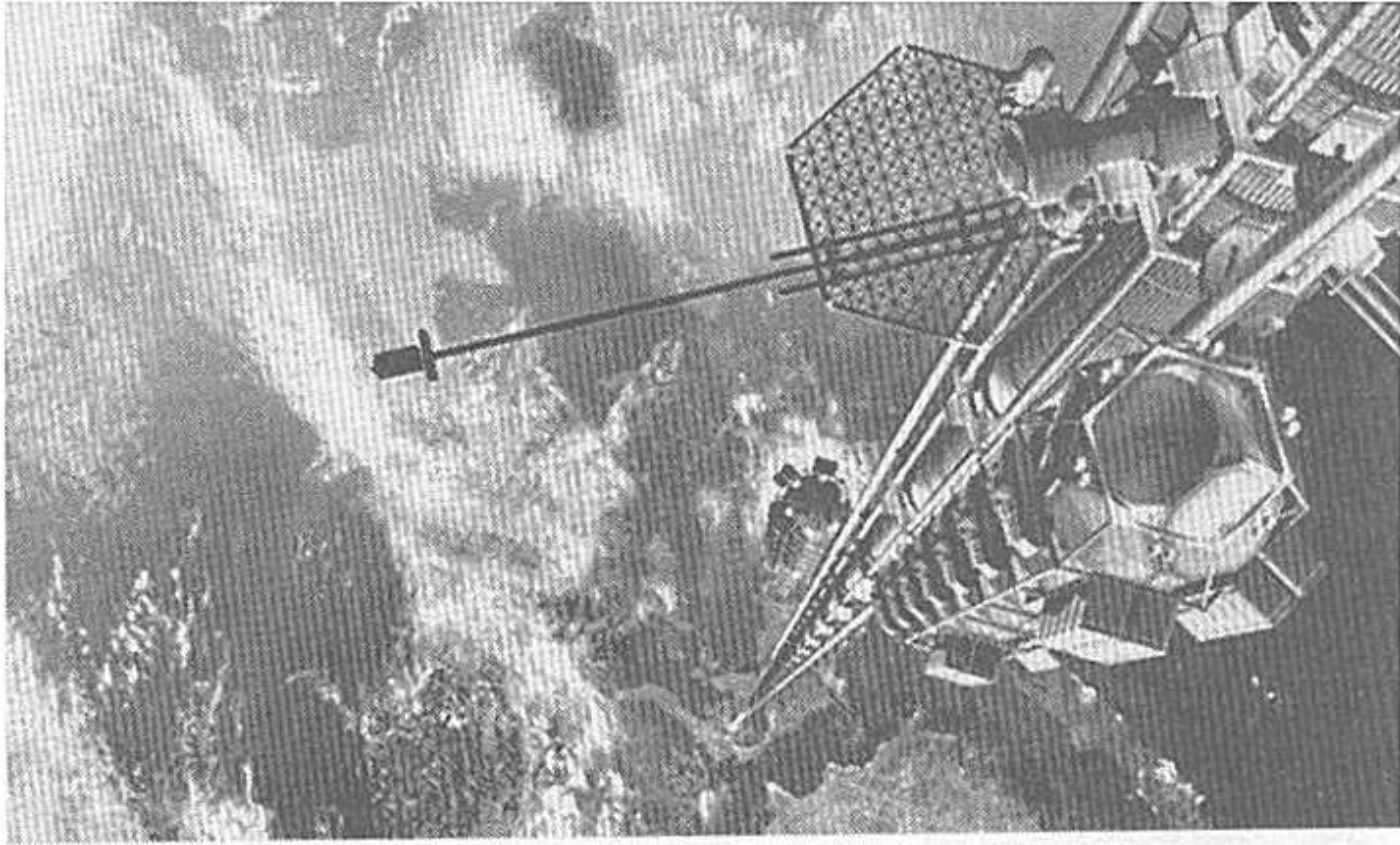
Отримання та промислове застосування нанотрубок сьогодні



Волокна, нитки, кабелі з нанотрубок

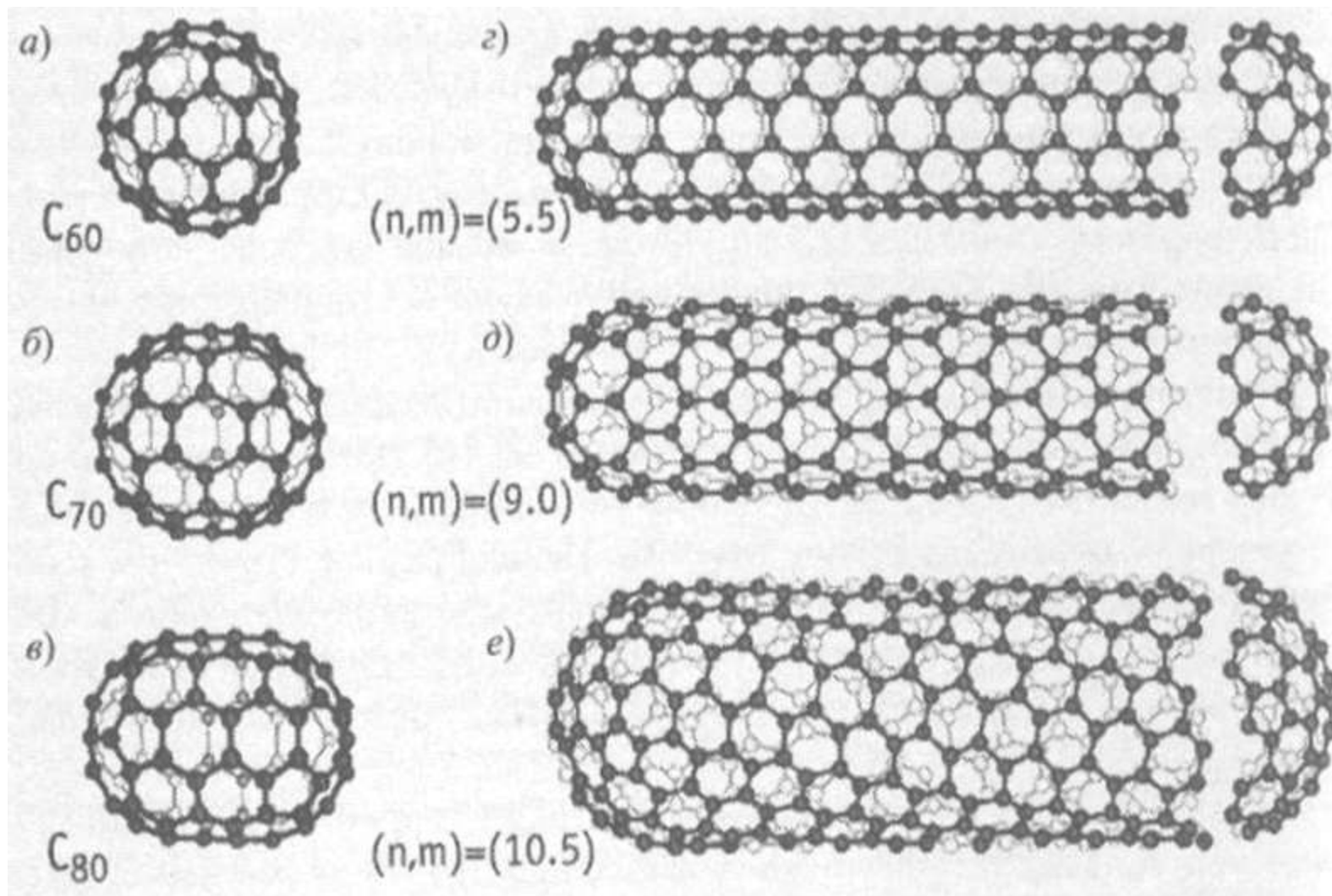


Властивості вуглецевих нанотрубок

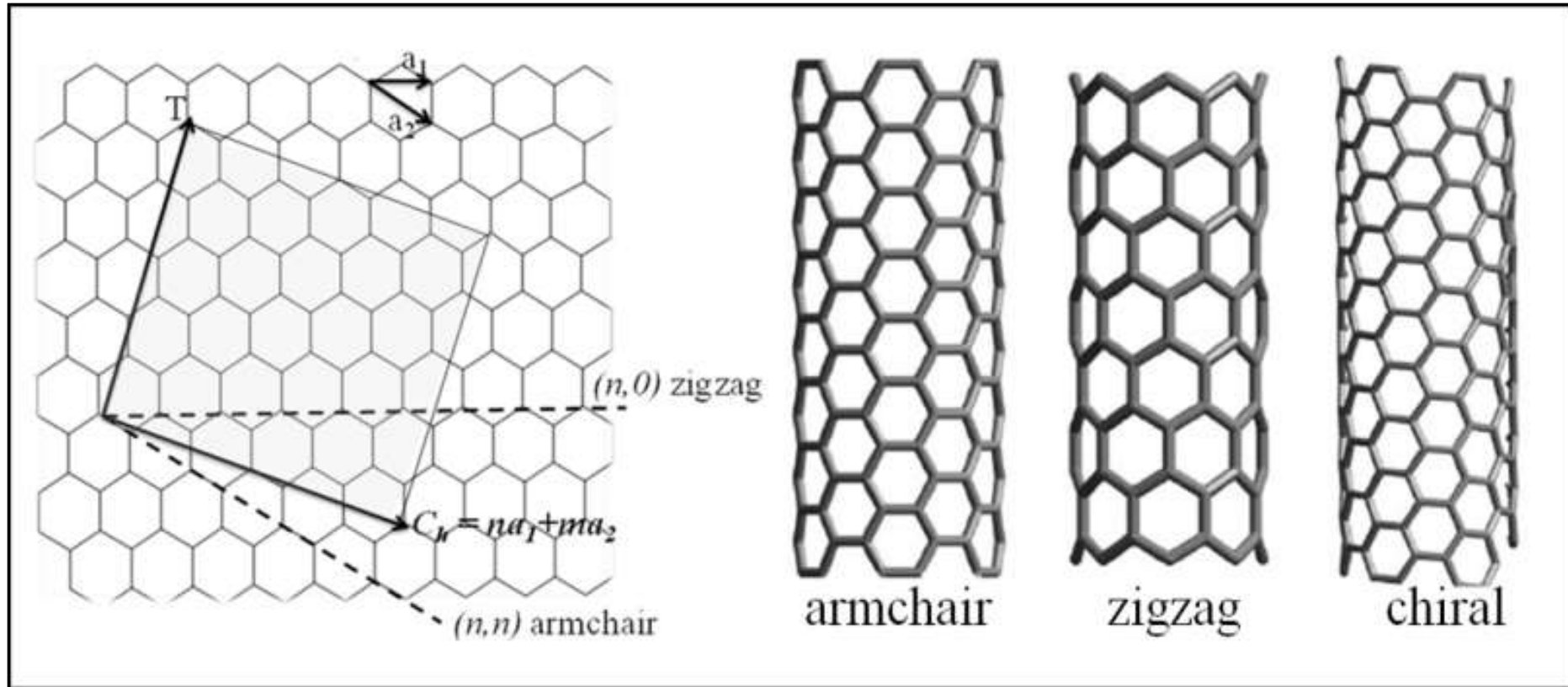


Космічний ліфт за версією NASA

Хіральність нанотрубок



Критерії для напівпровідникових та металічних трубок



$$|m-n|=3p+q$$

when

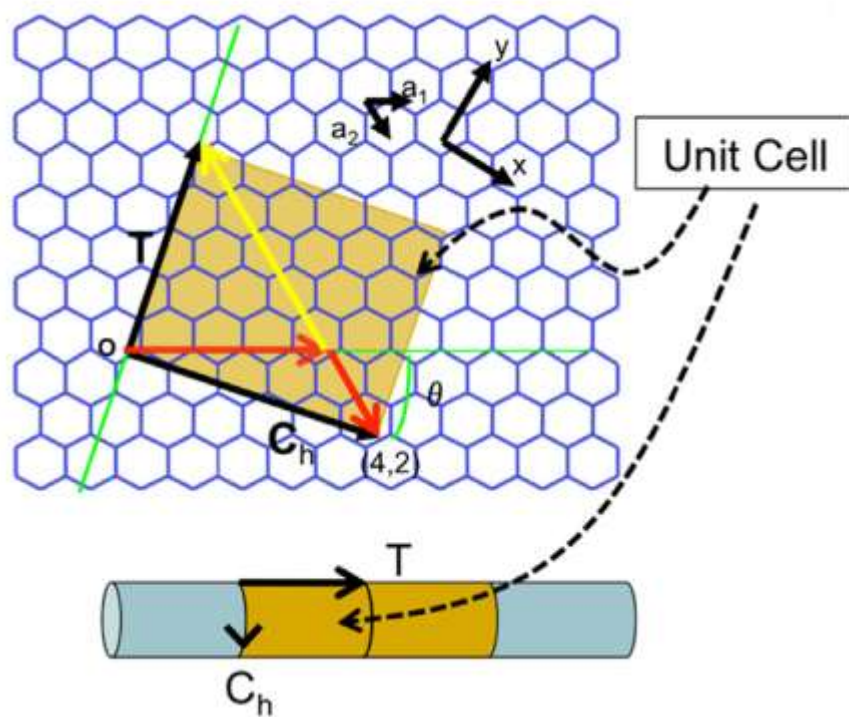
$$q=0$$

- metallic tubes

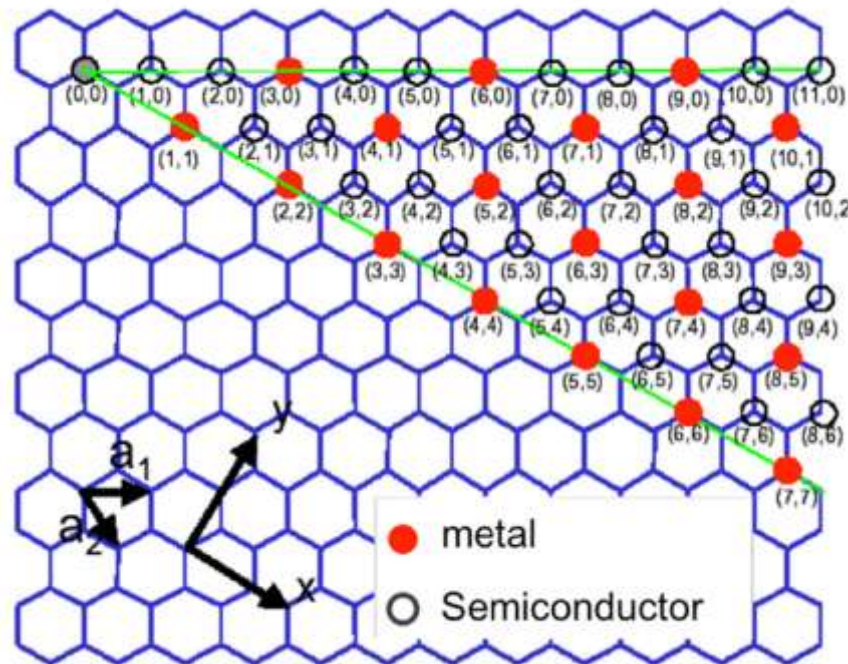
$$q=\pm 1$$

- semiconducting tubes

Індекси хіральності

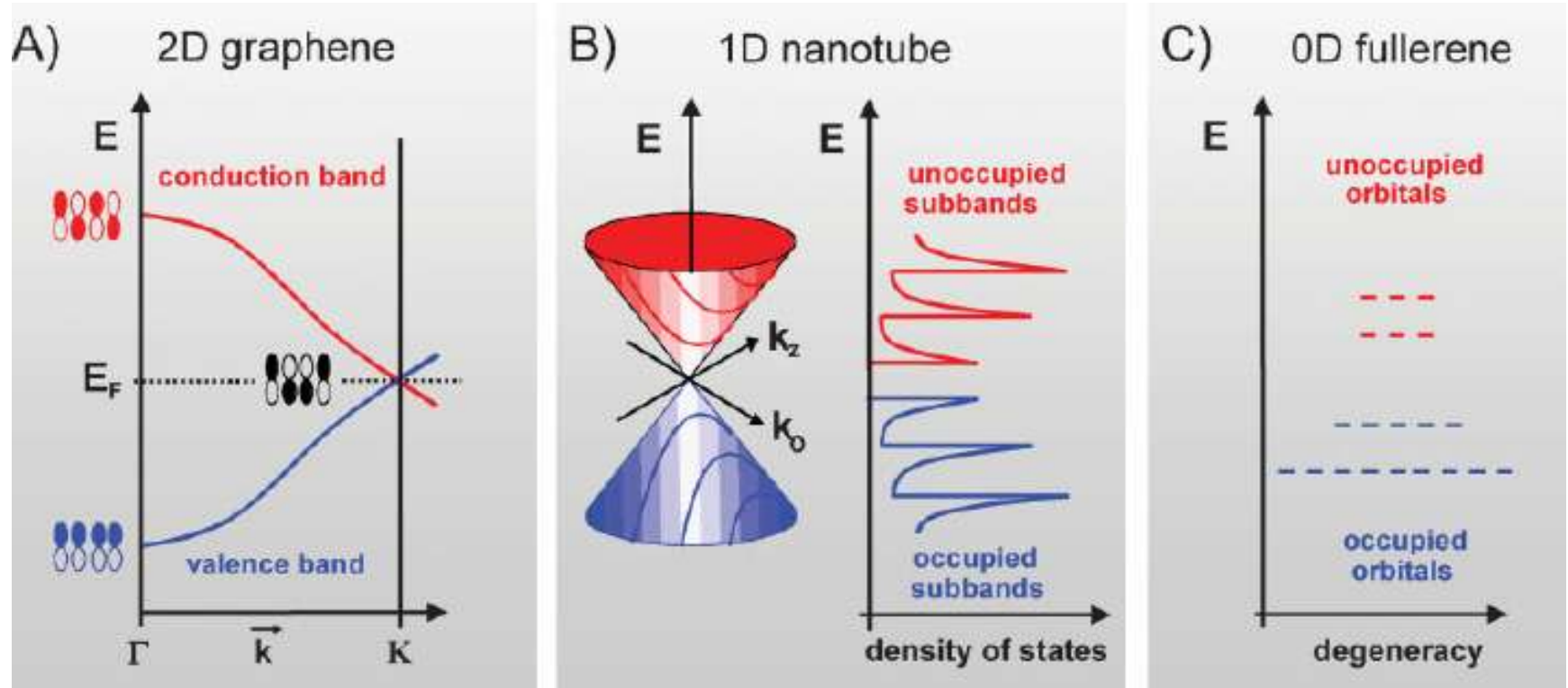


Schematic illustration of the structures of a (4,2) SWNT with lattice chiral vector C_h and tube axis T .



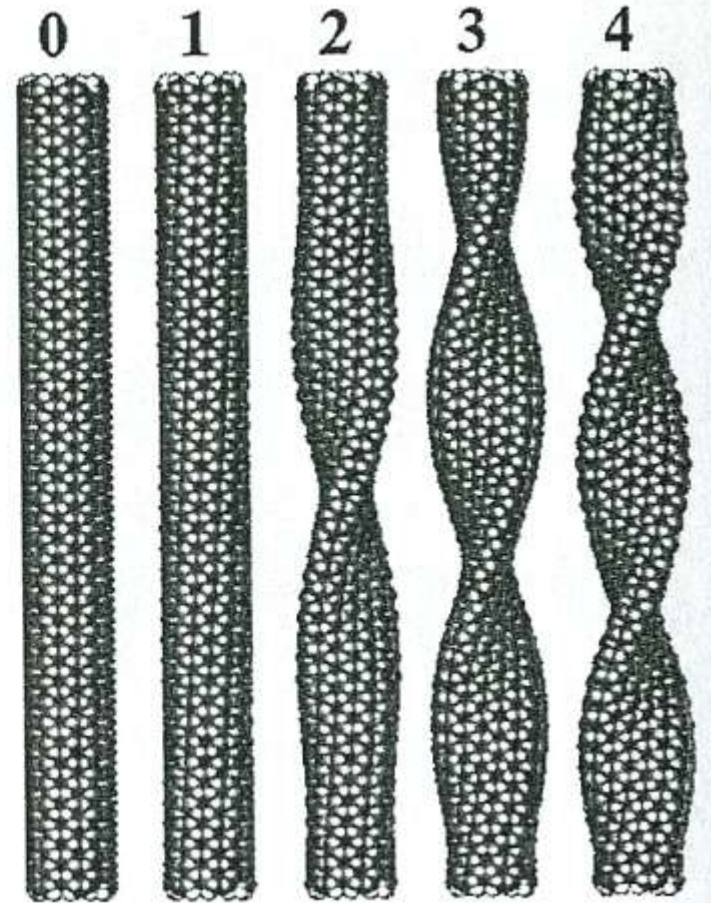
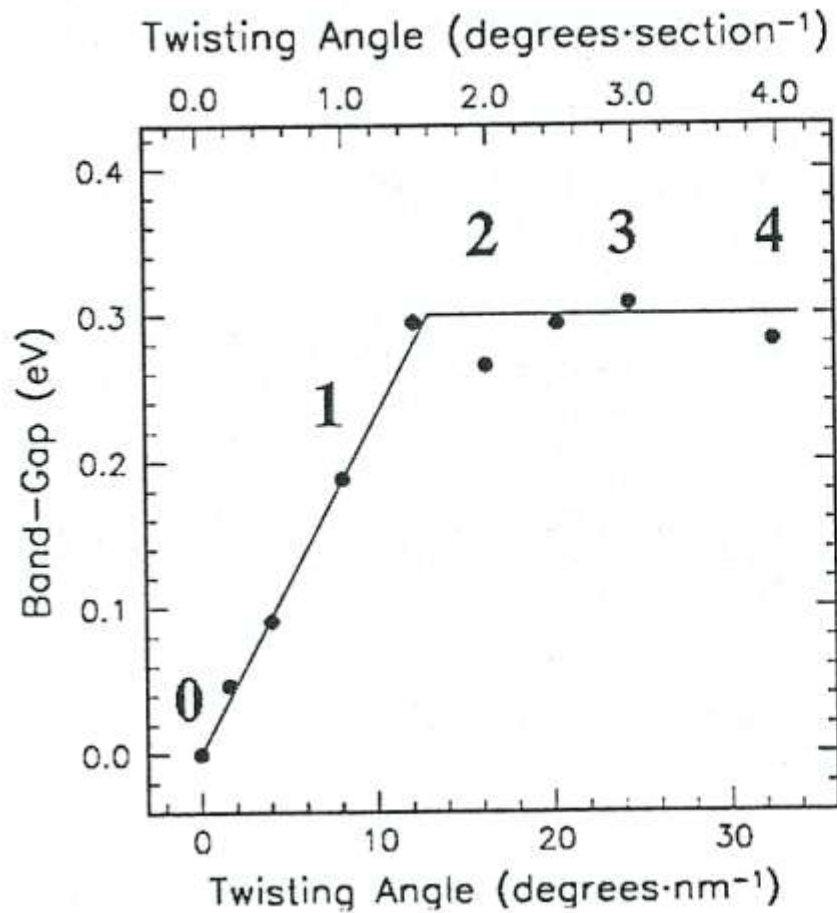
Graphene sheet map showing the chirality of various metallic and semiconducting SWNTs with C_h from $(0,0)$ to the shown SWNT chirality.

Особливості спектра для 2D, 1D та 0D структур



Schematic representation of A) a 1D section of the 2D band structure of graphene, B) the formation of 1D sub-bands in a carbon nanotube by restricting the wave vectors in circumferential direction and the resulting electronic DOS displaying van Hove singularities at the sub-band minima, and C) the set of discrete energy levels arising from the 3D confinement in C_{60} .

Band-Gap of SWCNT



Отримання вуглецевих нанотрубок (найбільш поширений спосіб)



Промислова установка з дуговим розрядом

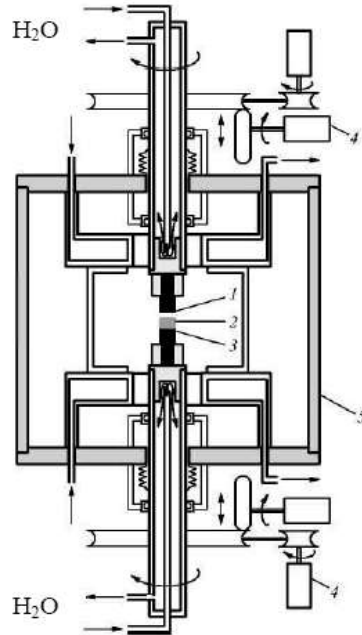


Рис. 5.50. Схема электродуговой
установки для получения
нанотрубок

1 — графитовый анод; 2 — осадок,
содержащий нанотрубки;
3 — графитовый катод; 4 — устройства
для автоматического поддержания
межэлектродного расстояния на
заданном уровне; 5 — стенка камеры.
Стрелками показаны направления
прокачивания воды, используемой для
охлаждения.

Дуговой разряд
відбувається при напругах
25-30 В,
густині струму 100 A/cm^2
і розрядному проміжку
1-2 мм.

Приблизно 90% маси на
катоді — це нанотрубки.
Вони формуються у
вигляді пучків з
діаметром 50 мкм
та довжиною 40 мкм

Електролітичний метод отримання нанотрубок

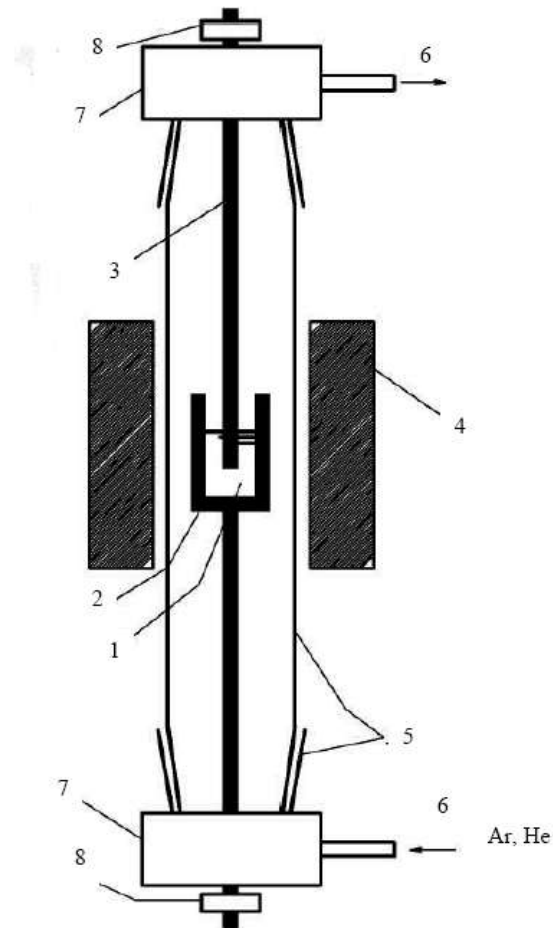
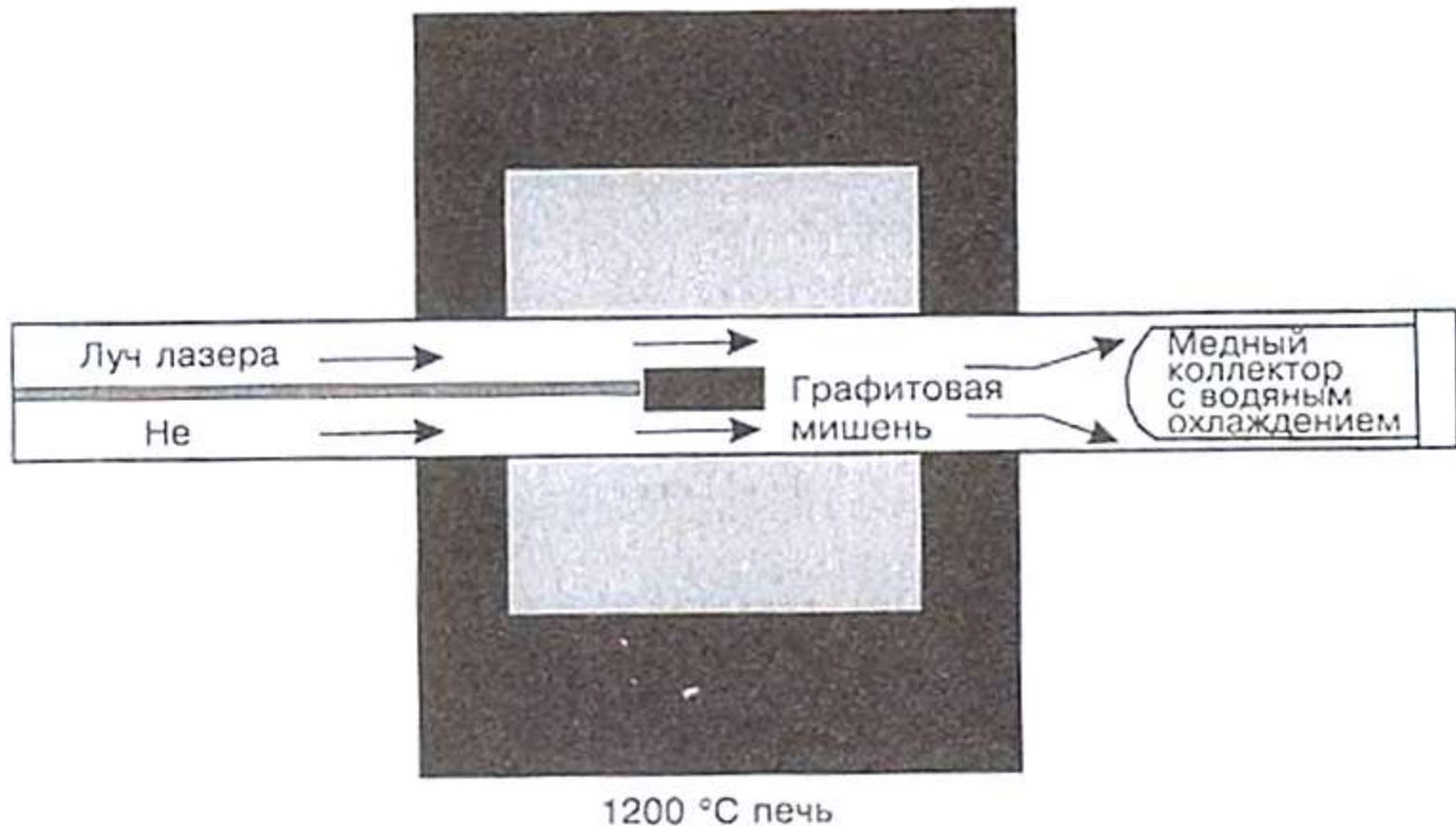


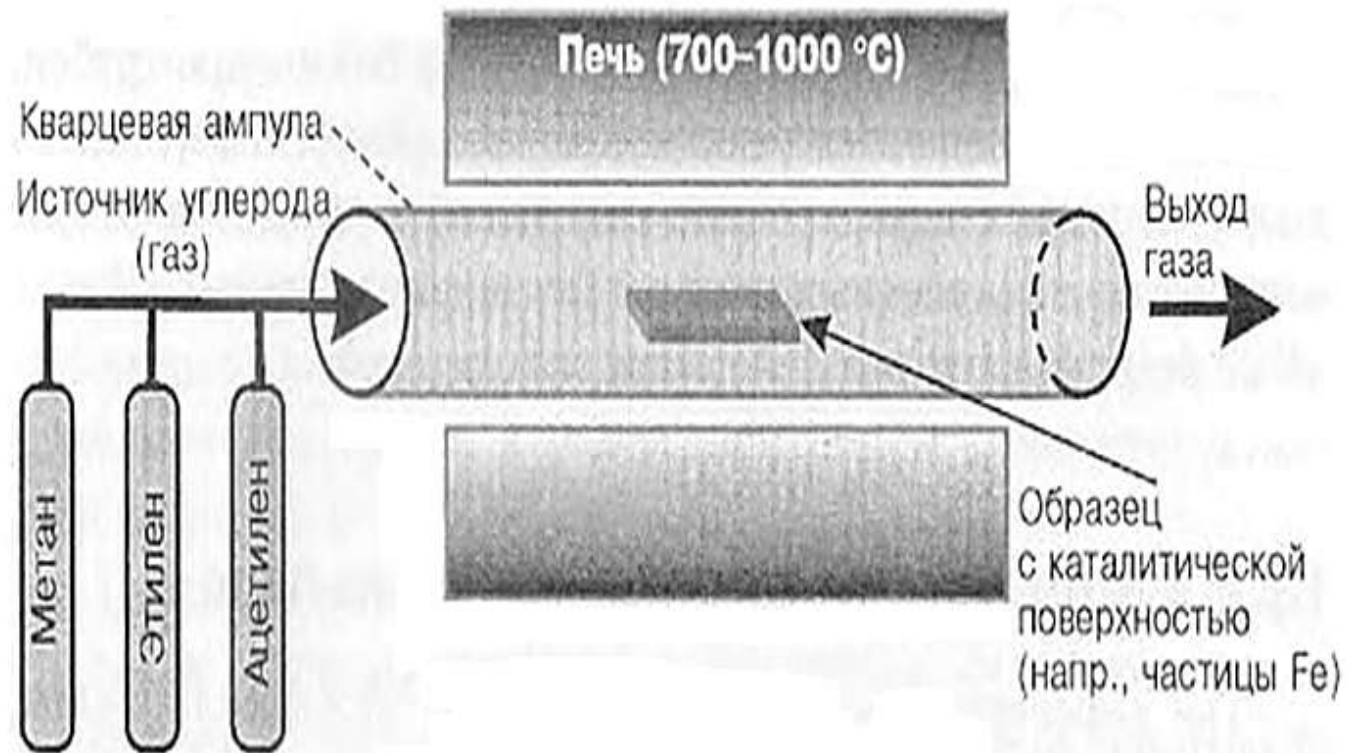
Рис. 5.53. Схема экспериментальной установки
для электролитического синтеза нанотрубок

1 – жидкий электролит; 2 – графитовый анод
с отверстием; 3 – графитовый катод; 4 – печь;
5 – кварцевая трубка; 6 – трубки для прокачивания газа; 7
– медные фланцы; 8 – уплотнительные кольца

Отримання вуглецевих нанотрубок (метод лазерної абляції)



Отримання вуглецевих нанотрубок (метод хімічного осадження)



Каталітичний метод отримання багатословових нанотрубок

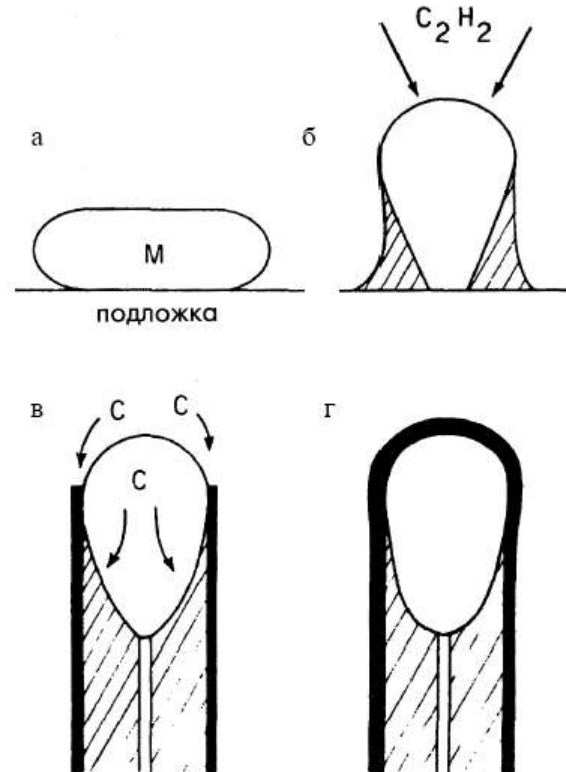
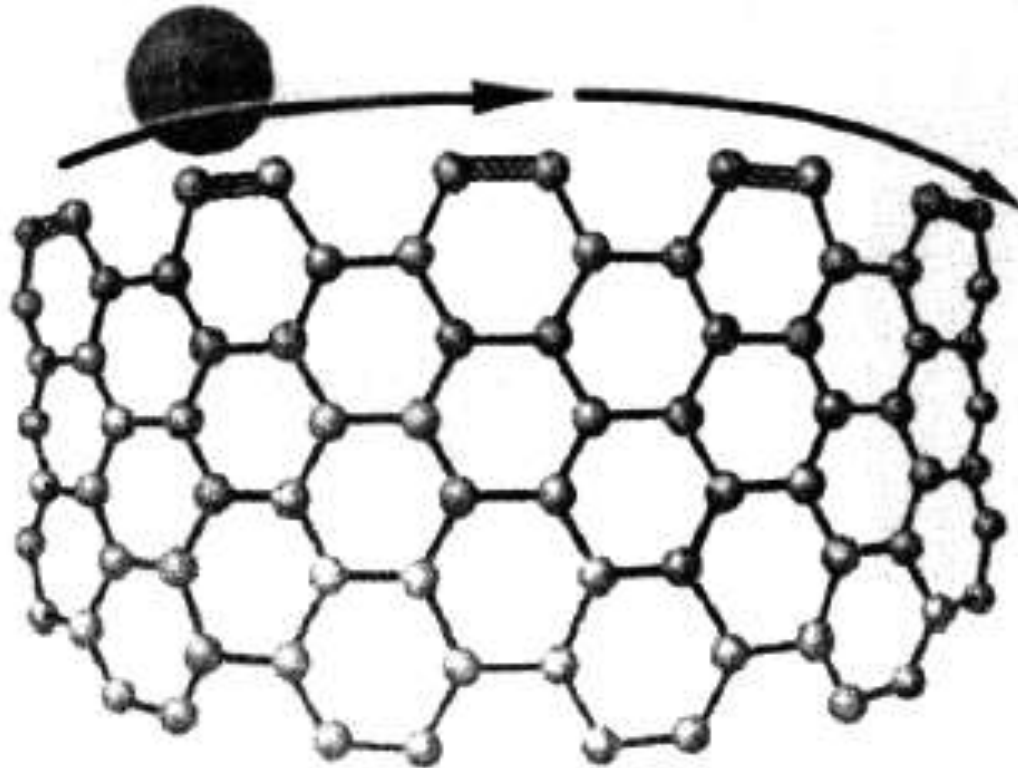


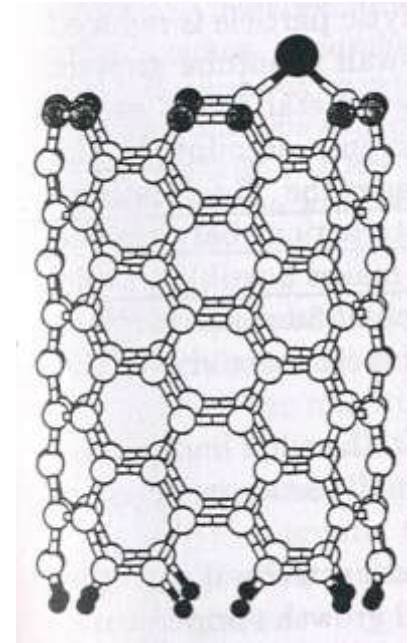
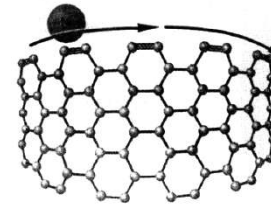
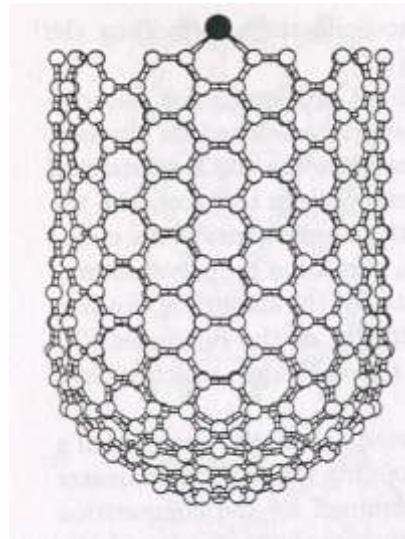
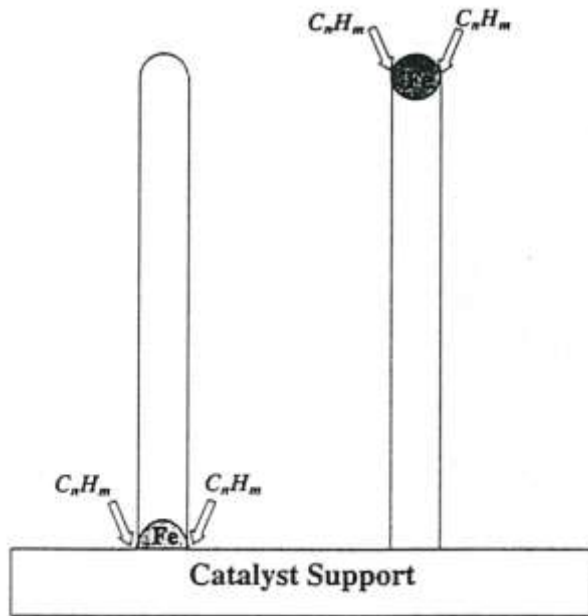
Рис. 5.51. Схем каталитического синтеза многослойных нанотрубок

а – исходная частица металла на подложке,
б – разложение углеводорода,
в – диффузия углерода сквозь металл и рост стенки нанотрубки.

“Самокатний” механізм каталітичного росту нанотрубок



Каталітичне вирощування нанотрубок

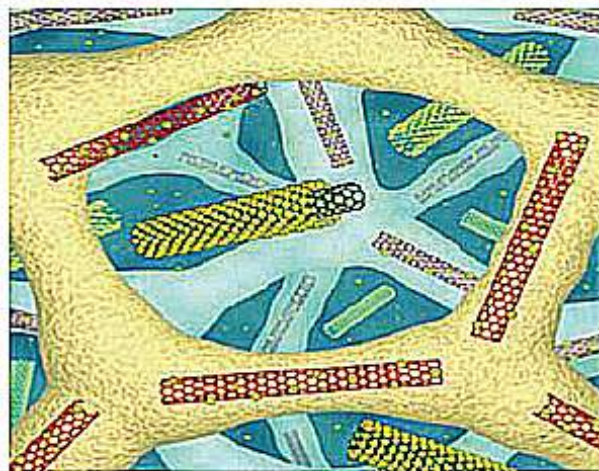


View of (10,10) armchair nanotube (white ball-and-stick atomic structure) with a Ni (or Co) atom (large black sphere) chemisorbed onto the open stage.

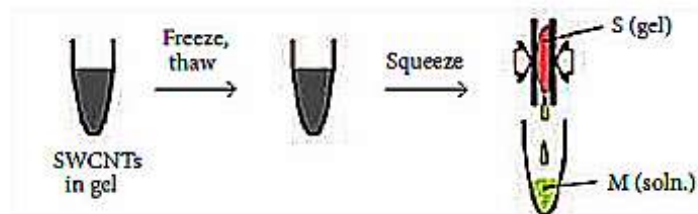
The metal catalyst keeps the tube open by “scooting” around the open edge, insuring that any pentagons or other pentagons or other high energy local structure are rearranged to hexagons (310 °C).

The metal catalyst atom can not prevent the formation of pentagons at 1200°C.

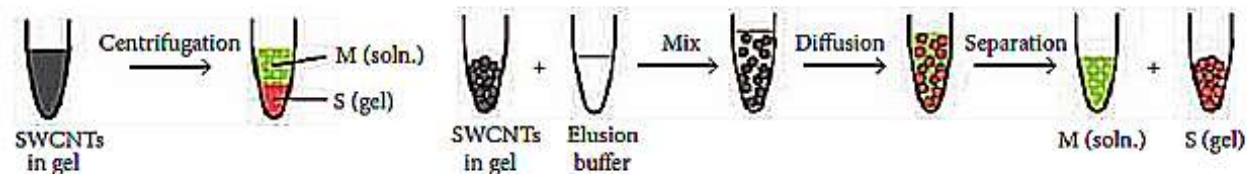
Схеми сепарування CNT



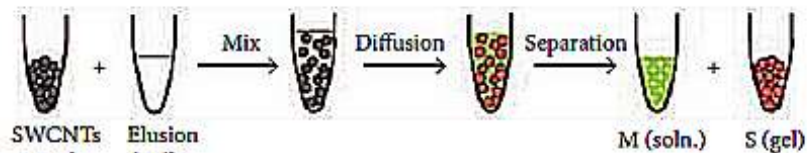
(a)



(b)



(c)



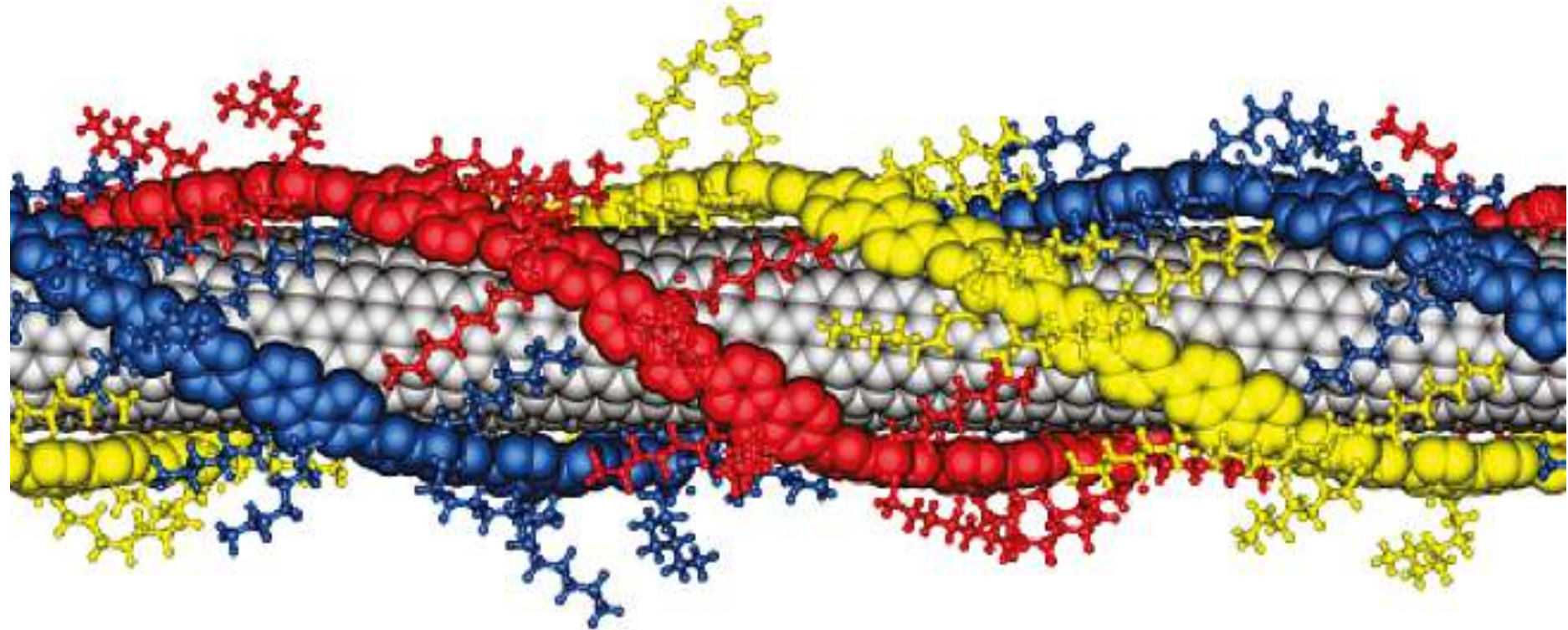
(d)



(e)

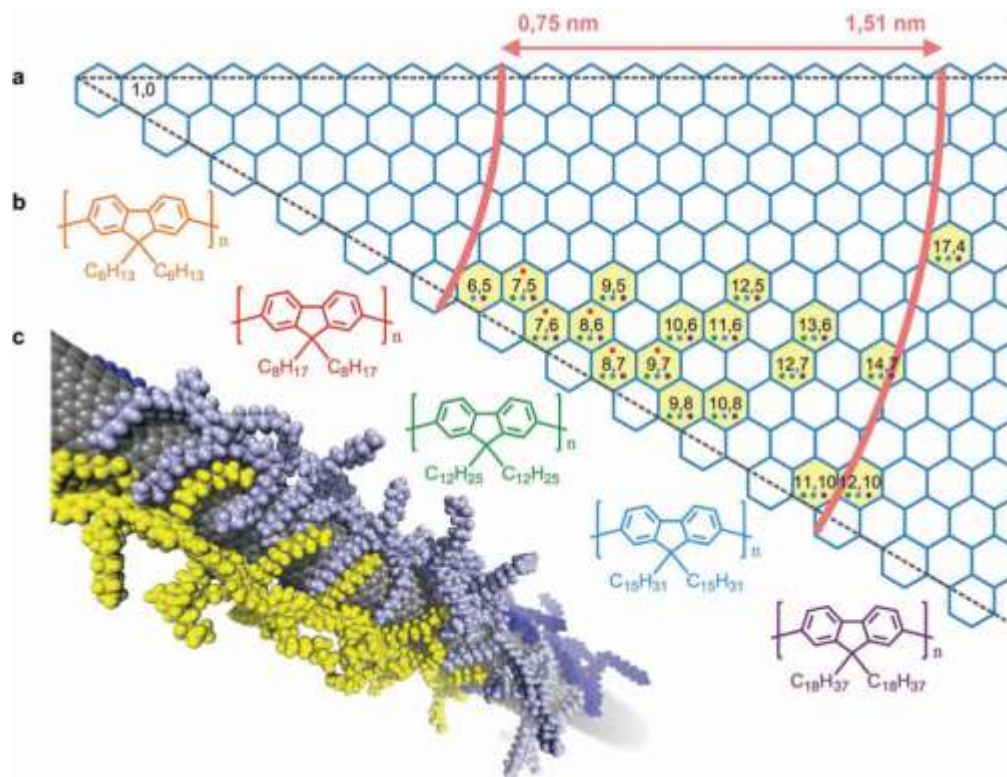
(a) Model of MS separation using agarose gel. Red, semiconducting SWCNTs; beige, agarose gel matrix; green, metallic SWCNTs; yellow, SDS(sodiumdodecyl sulfate). (b) Freeze and squeeze. (c) Centrifugation. (d) Diffusion. (e) Permeation.

Технологія обгортання CNT



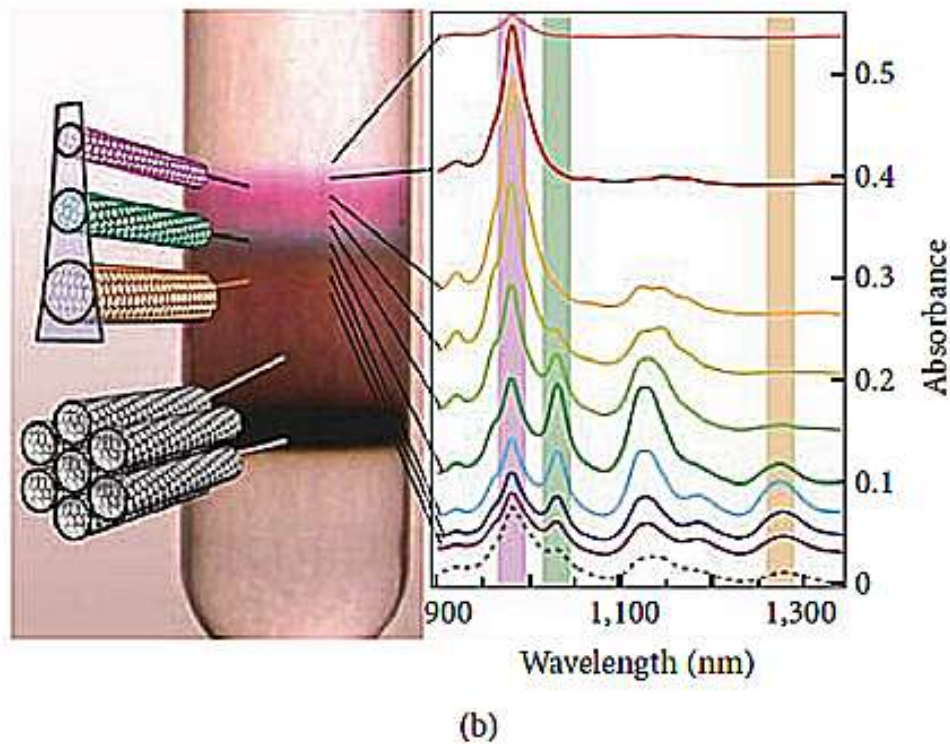
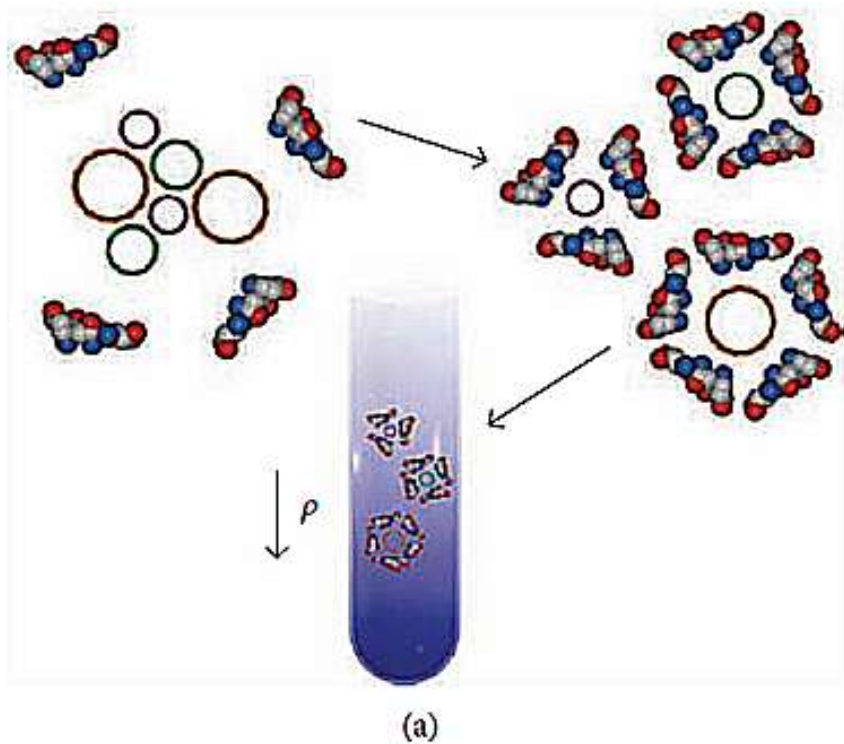
(8,6) Nanotube wrapped by three PFO(polyfluorene) chains (represented as blue, red, and yellow structures) forming helices.

Формування напівпровідникових CNT



(a) Chirality map of SWCNTs selected by polymer wrapping. In yellow the SWCNTs selected are underlined; the color of the dots inside the hexagons indicates which of the polyfluorene derivatives (color code used for the chemical structures) is able to select the nanotubes. (b) Chemical structure of the polyfluorene derivatives used: PF6, PF8 (commonly known as PFO), PF12, PF15, and PF18. (c) Structure as obtained by molecular dynamics simulations of three PF12 chains wrapped around a (12,10) nanotube after 10 ns at constant-pressure in toluene solution.

Сортування та виділення CNT



(a) Schematic of SWCNTs surrounded by surfactant and their sorting. (b) Picture of SWCNTs after separation and the optical absorbance spectra. SWCNTs were sorted evidently.

Багатошарові нанотрубки

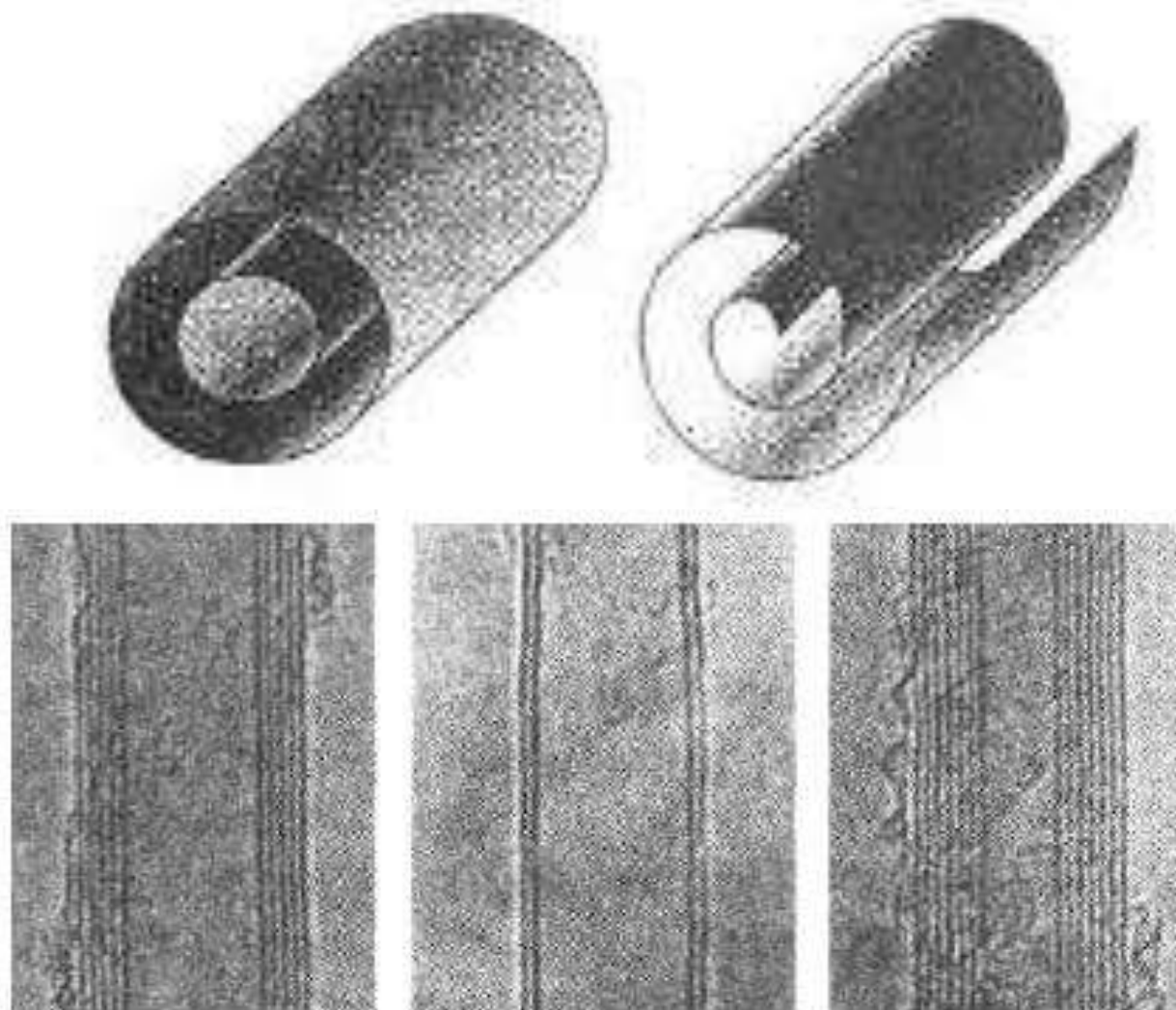


Рис. 5.25. Фрагменты многослойных нанотрубок [6]

Зігнуті нанотрубки

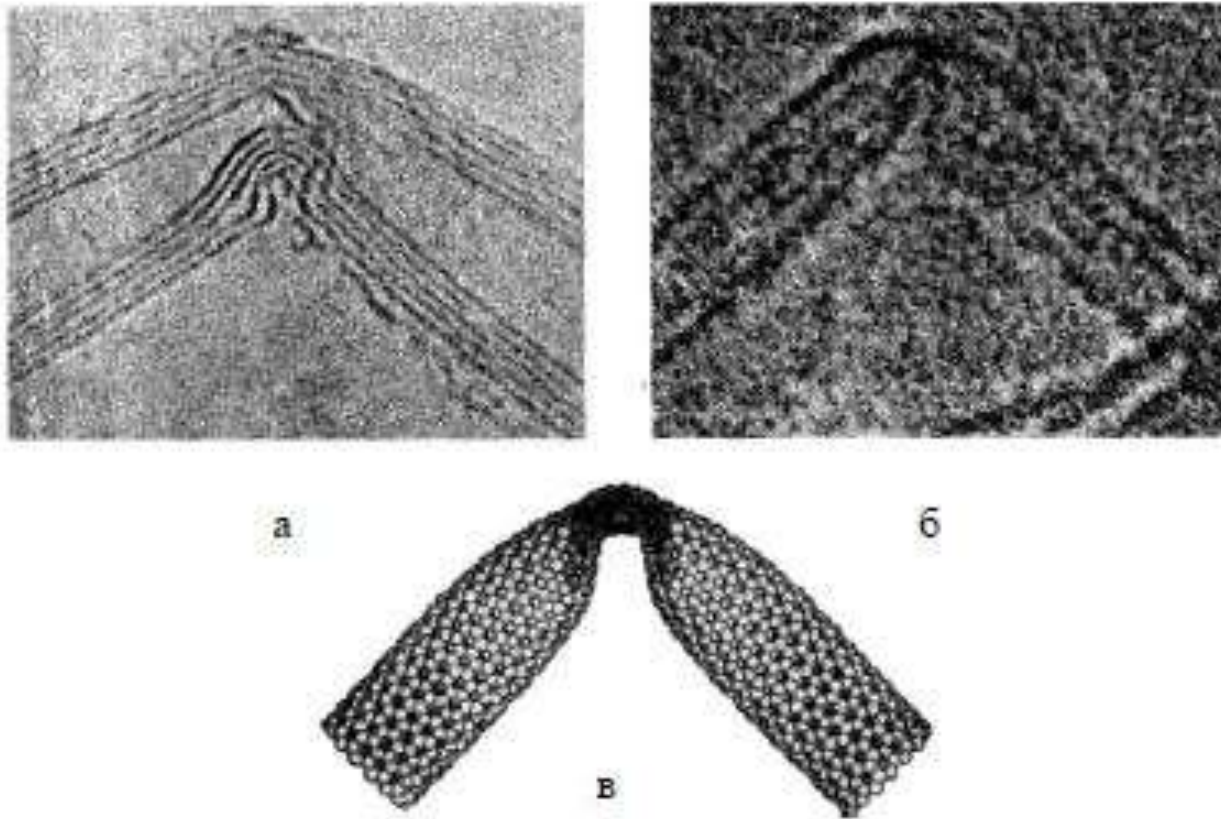


Рис. 5.30. Изображения изогнутых многослойной (а) и однослойной (б) нанотрубок и модель изогнутой структуры (в) [6]

Електронні прилади

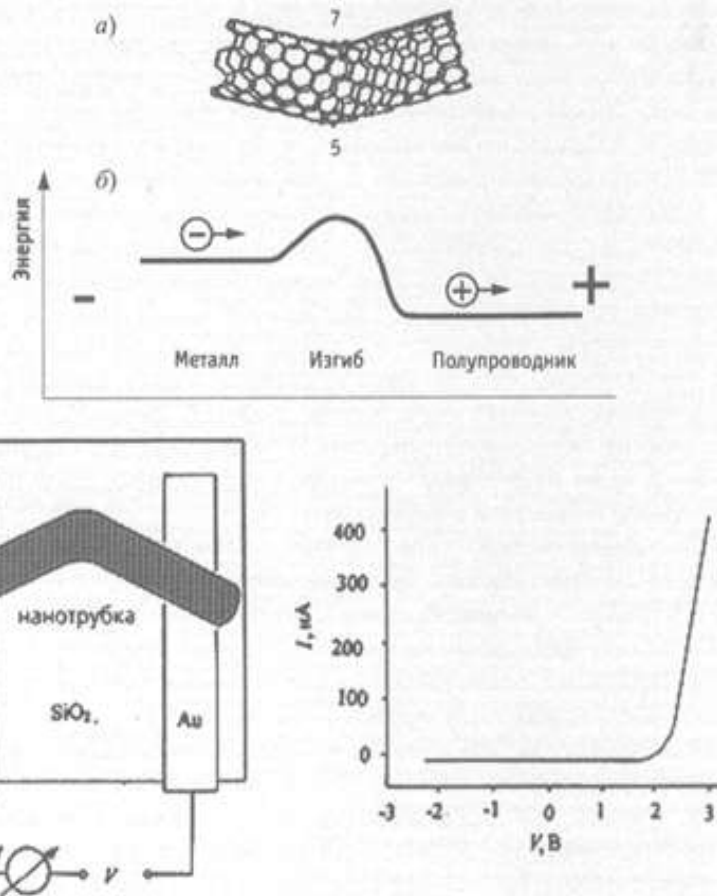


Рис. 14.18. (а) Изгиб углеродной нанотрубки за счёт введения дефекта «семиугольник-пятиугольник», (б) влияние изгиба нанотрубки на энергию подвижных электронов, (в) выпрямляющий диод Шоттки на изогнутой нанотрубке. Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими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

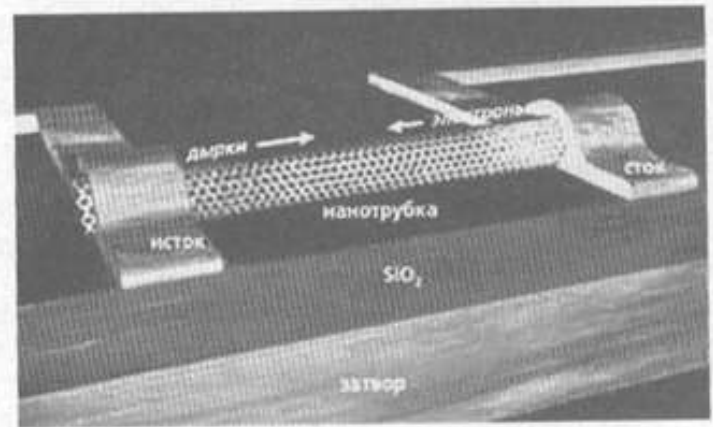


Рис. 14.19. Полевой транзистор на полупроводниковой нанотрубке. Нанотрубка лежит на слое изолятора (кварц) в контакте с двумя сверхтонкими металлическими электродами, в качестве третьего электрода (затвора) используется подложка кремния [108]

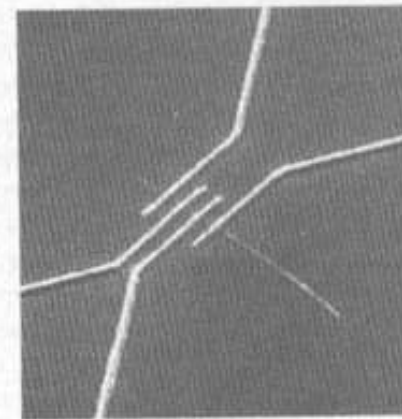


Рис. 14.20. Приборная структура для измерения удельного электрического сопротивления индивидуальных нанотрубок четырёхконтактным способом [110]

Нанотранзистор на нанотрубці

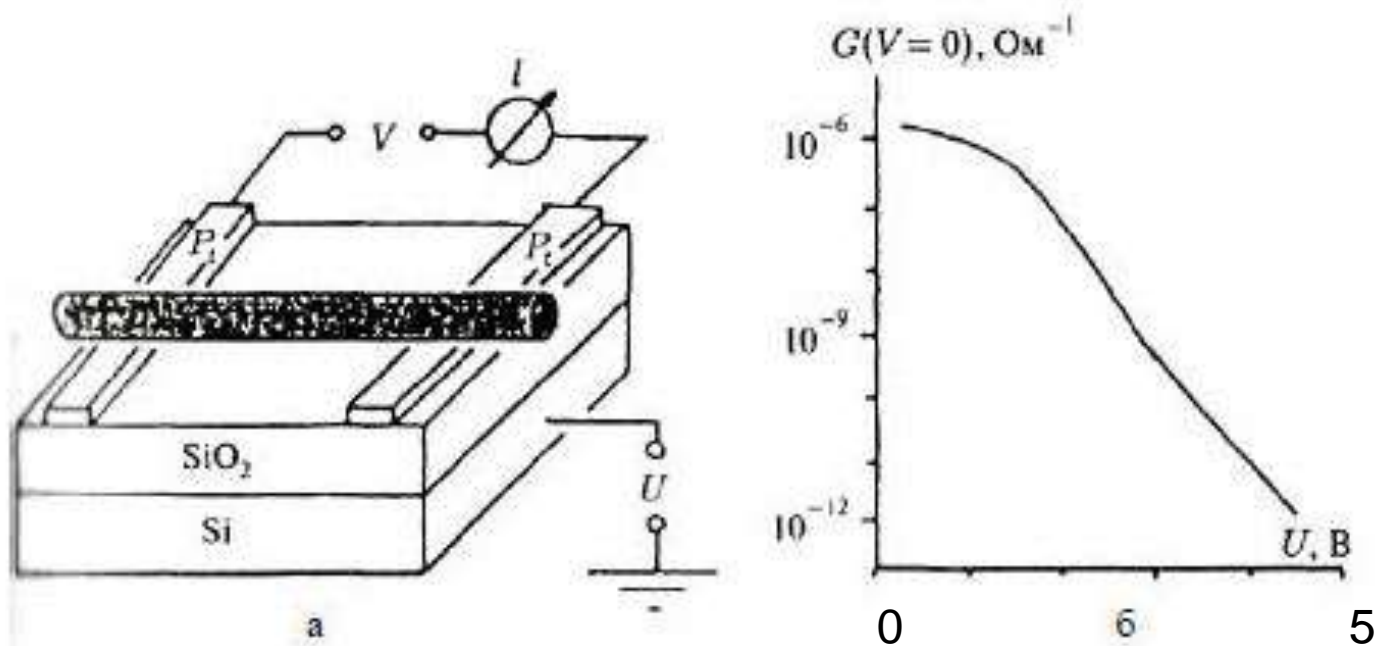
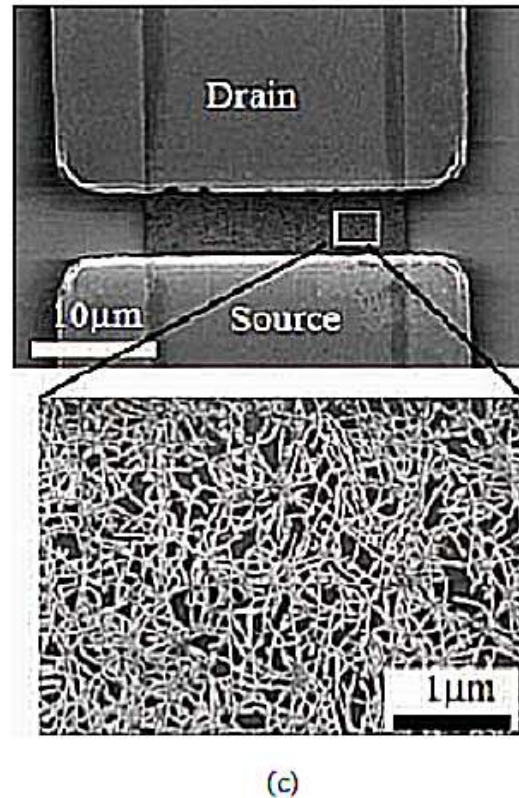
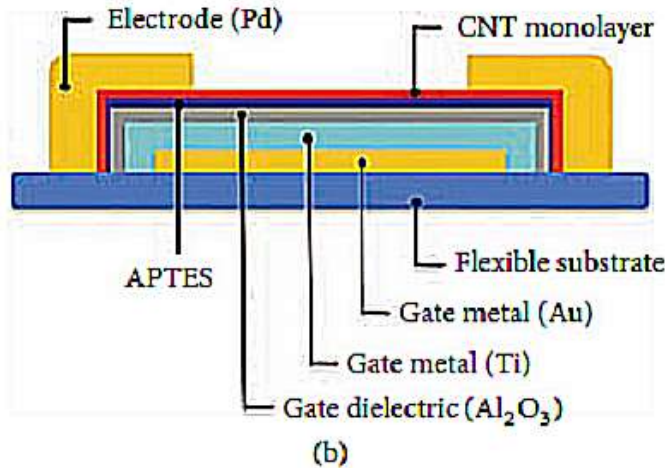
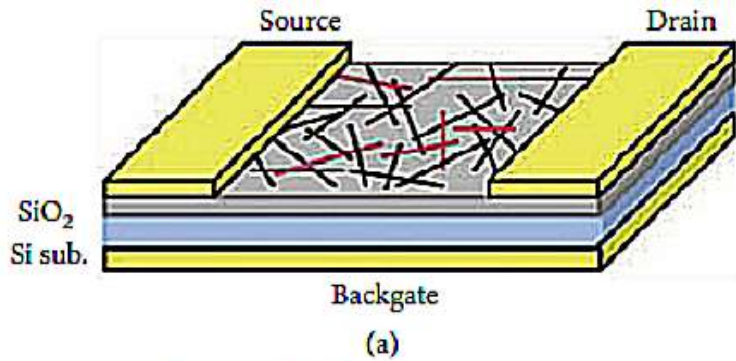


Рис. 5.44. Полевой нанотранзистор на полупроводниковой нанотрубке [7]
а – схема нанотранзистора, б – зависимость проводимости цепи нанотранзистора G от потенциала затвора U

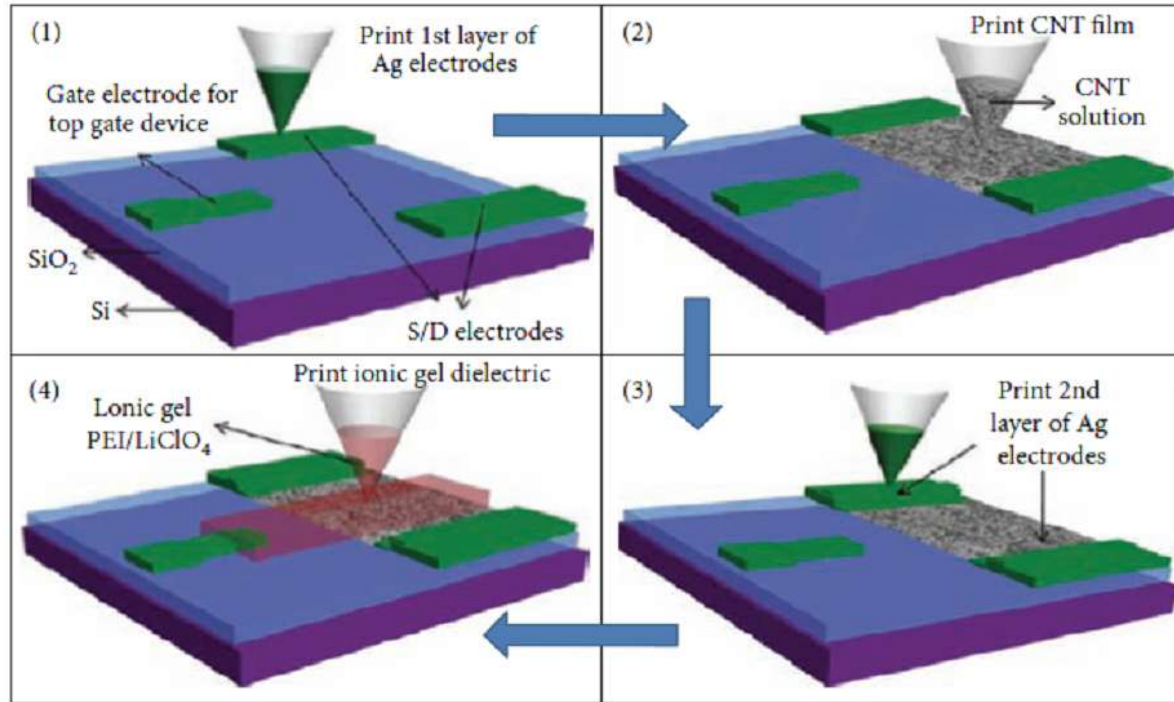
Нанотрубки на гнучких підкладках



3-amino-propyltriethoxysilane (APTES)

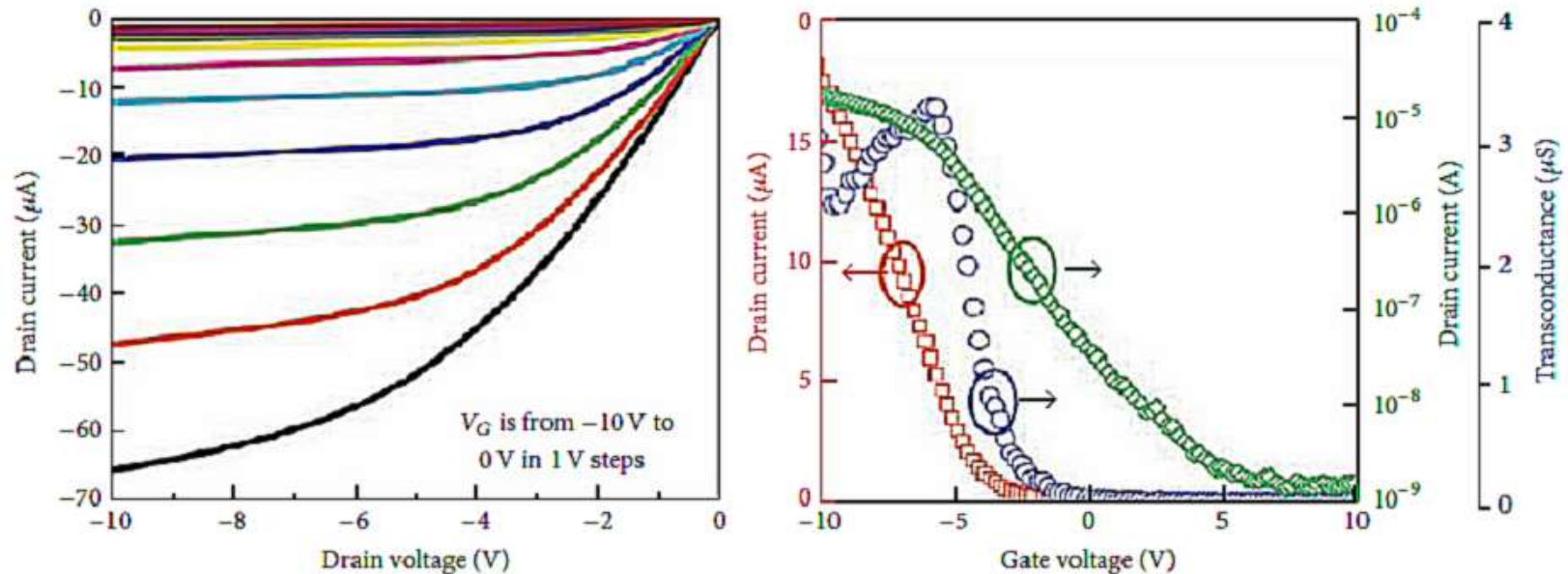
Typical structure of SWCNT-TFT. (a) Schematic diagram. This type of TFT is fabricated on silicon wafer. The silicon substrate works as the backgate and SiO₂ works as the gate dielectric. (b) Schematic diagram 2. The other type of TFT is fabricated on flexible substrate like polyamide. (c) SEM image of a TFT fabricated on silicon substrate with SWCNT network as its channel.

Printing technology TFT based on CNT



Schematic for fabrication process of a SWCNT-TFT by ink-jet printing. The whole device was fabricated by printing. First, a layer of silver ink was printed on the substrate to form source and drain electrode. The silver layer was sintered at a temperature of 180°C to obtain low resistance. Then SWCNT solution was used as ink to print the channel. After that, another layer of silver ink was printed to improve the contact between SWCNT and silver electrode. Finally, the gate dielectric and gate electrode were fabricated.

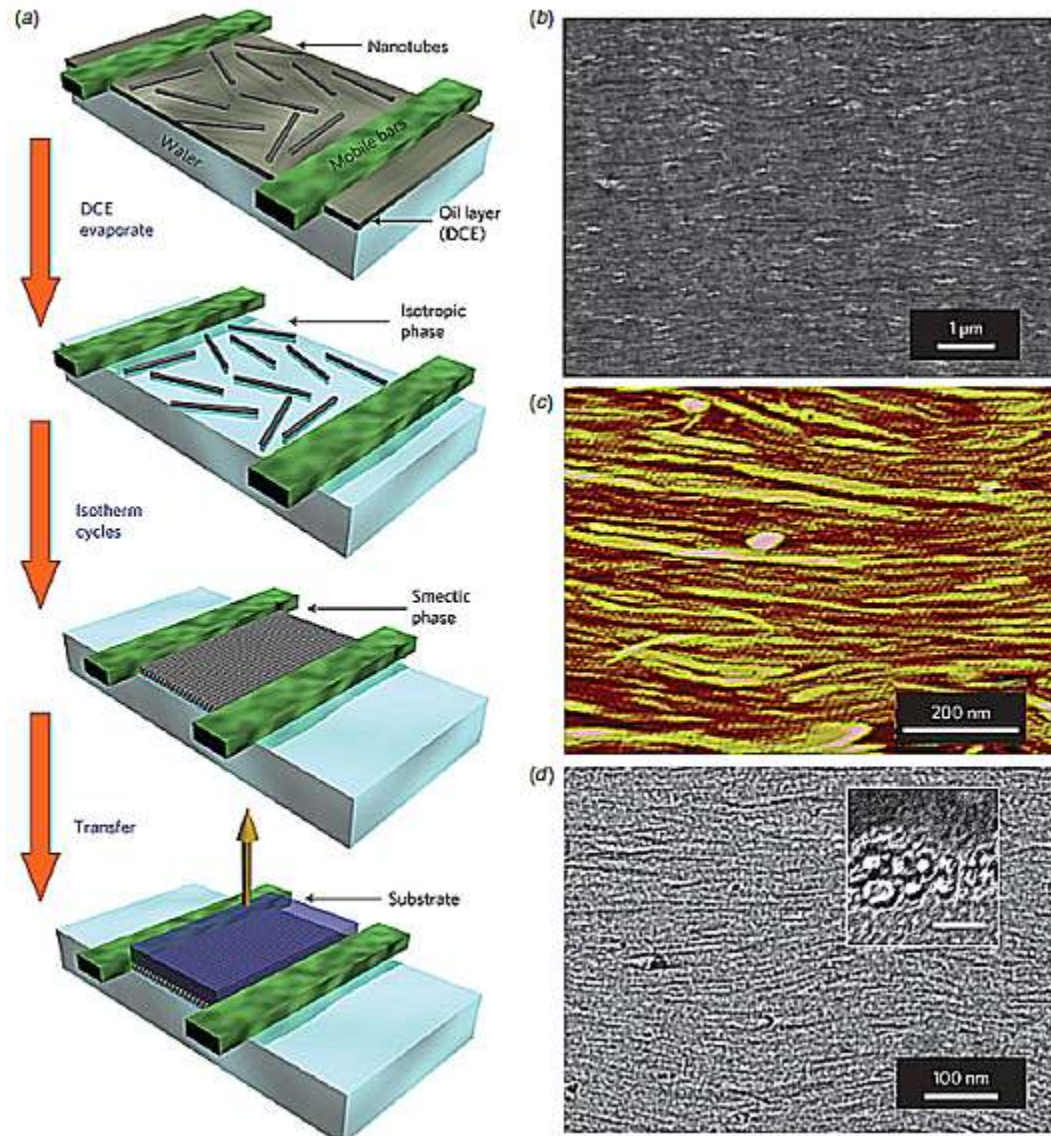
TFT транзистори на сіткових CNT



Drain current and transconductance versus voltage characteristics of SWCNT-TFTs.

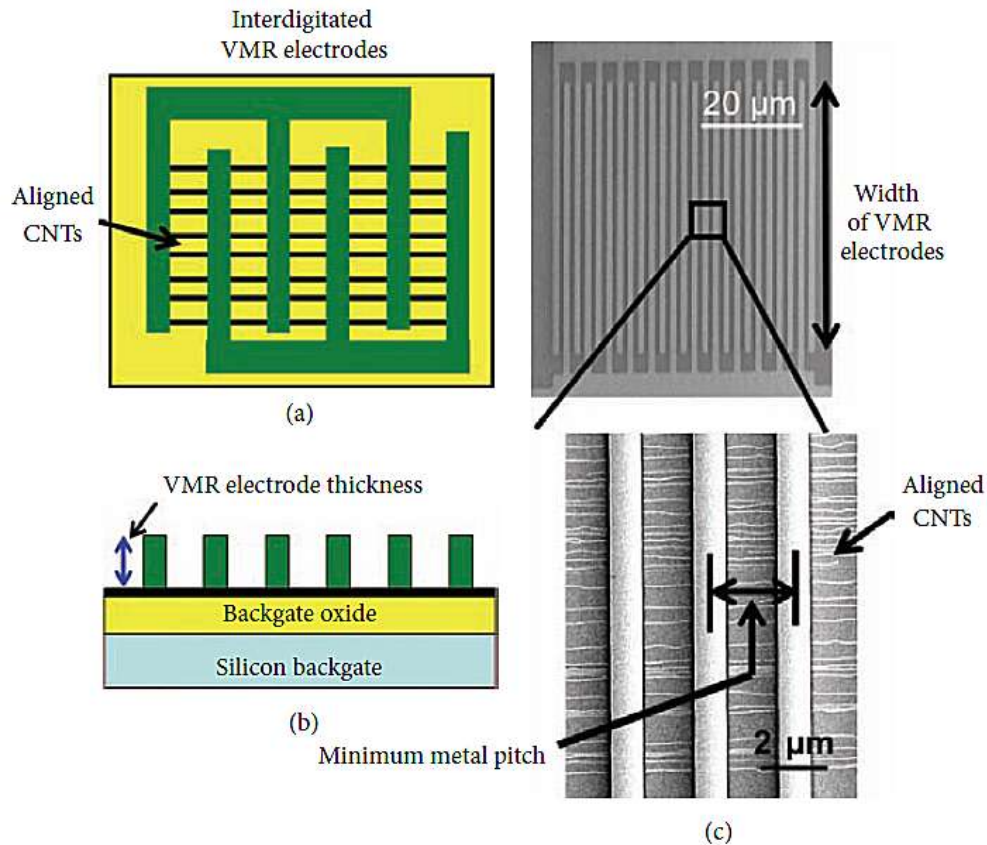
There is a peak in the transconductance curve, and it suggests a near linear subthreshold slope. When drain voltage is small, the device shows a linear relationship between drain current and voltage. With the increase of drain voltage, it shows semiconducting characteristics and acts as a P-type transistor.

Масиви лінійно впорядкованих CNT



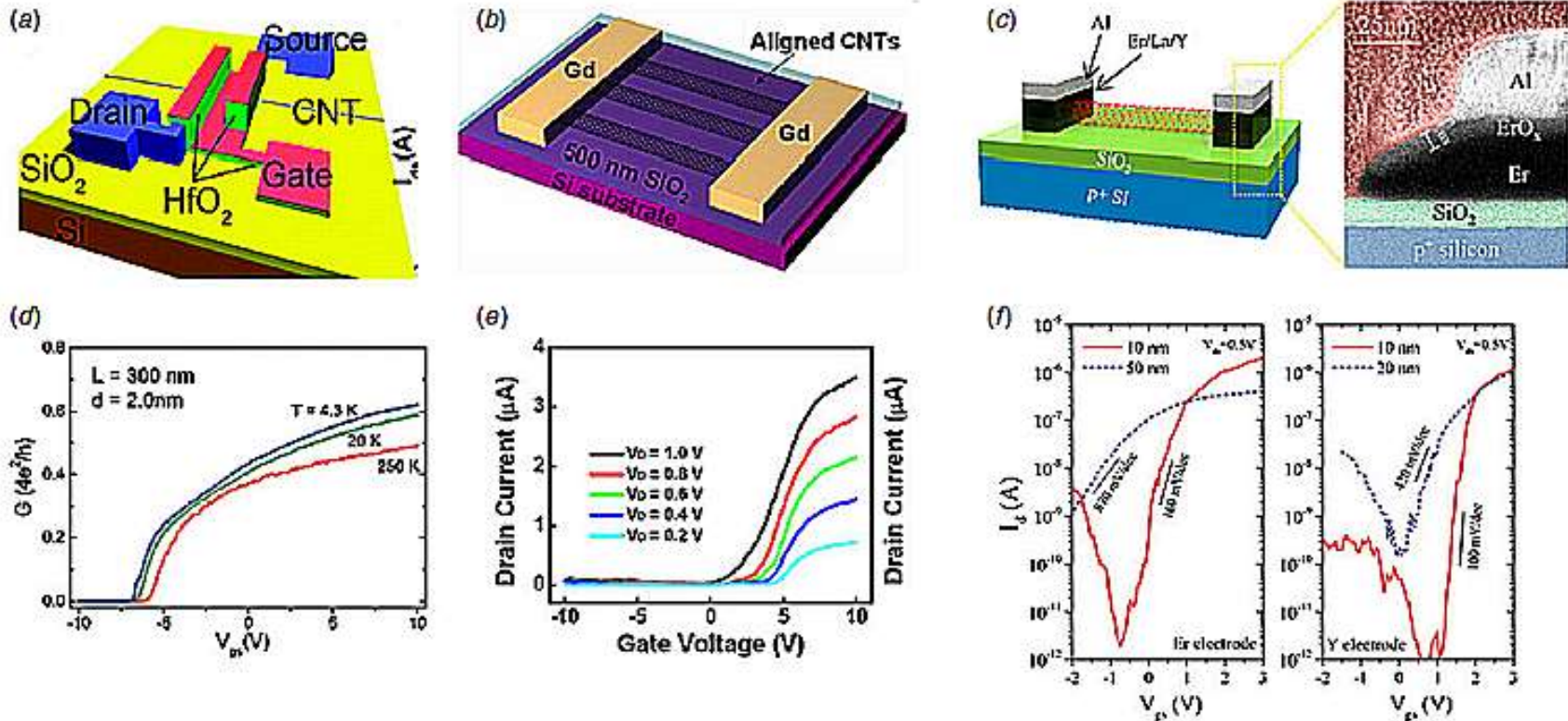
Langmuir–Schaefer assembly of full-coverage aligned semiconducting CNT arrays. (a) Schematic of the Langmuir–Schaefer assembly process flow. (b)–(d) SEM(b), AFM (c), TEM (d) images of aligned nanotube arrays on substrates.

Електричне випалювання металевих CNT



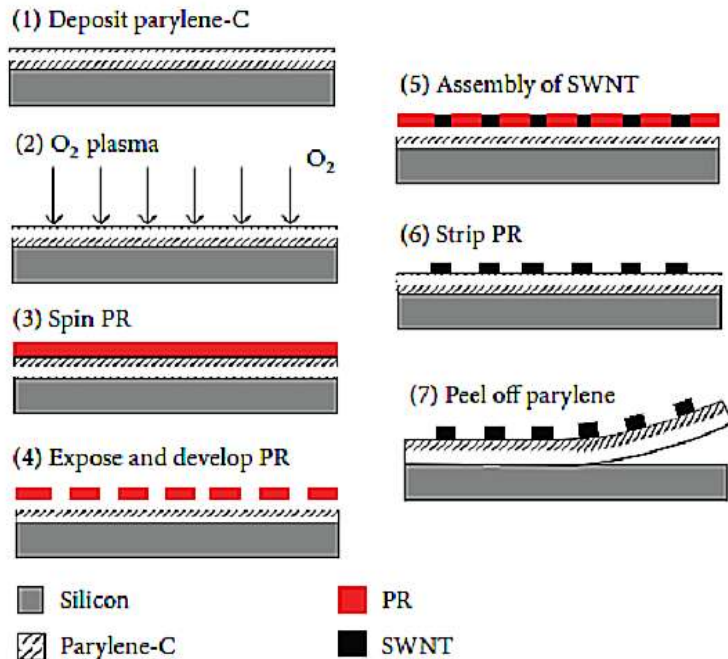
View of VLSI compatible Metallic CNT Removal (VMR) structure. (a) Top view. (b) Cross-sectional view. (c) SEM image (top view). The high voltage is applied to the interdigitated electrodes. The silicon backgate with an appropriate voltage turns off the semiconducting CNTs. Metallic CNTs between digitation will breakdown.

N-type TFT транзистори на CNT



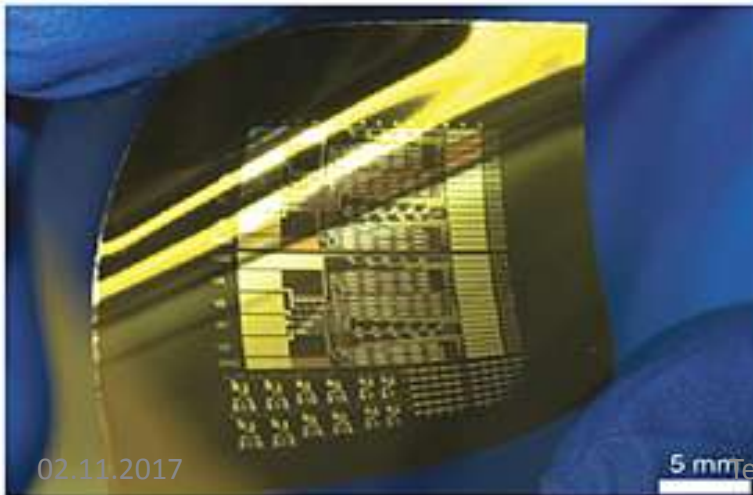
(a)–(c) Schematic of N-type transistor from reference, respectively. (d)–(f) Representative transfer characteristics of N-type transistor corresponding to transistor structure (a)–(c). In order to achieve nanotube transistors with n-type behavior, metals with small work function need to be used.

Нанотрубки на органічних підкладках



Schematic drawing of the direct patterning of SWCNTs onto a flexible substrate. The parylene-C film was disposed by O₂ plasma for 30 s to change hydrophobic surface into hydrophilic and defined microchannel by optical lithography. Then dipped the chip into aqueous SWCNT solution and pulled it up slowly with a speed of 0.1 mm/min.

Photoresist was removed by acetone after completing dip coating. The flexible parylene-C SWCNT film could be peeled off from the substrate.



Optical microscopy image of an integrated circuit consisting of several dozens of SWCNT-network transistors on a thin polyimide sheet.

Наномеханізи



Рис. 5.32. “Наноподшипник” на двух нанотрубках

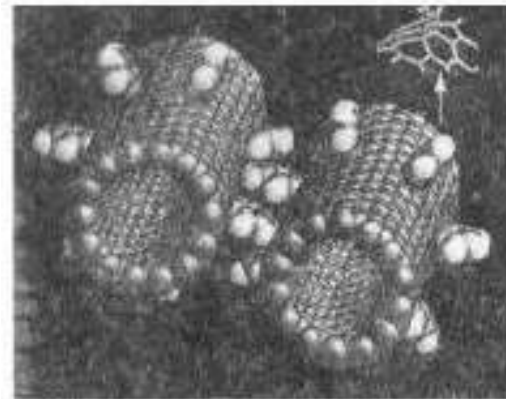


Рис. 5.33. Зубчатая передача на нанотрубках

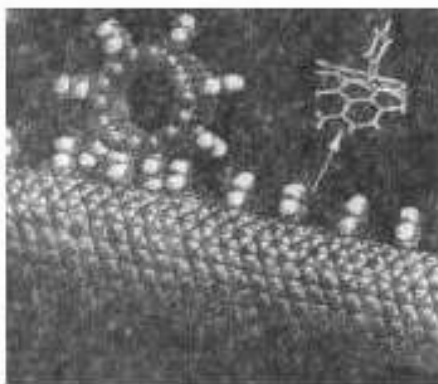


Рис. 5.34. Червяная передача на нанотрубках

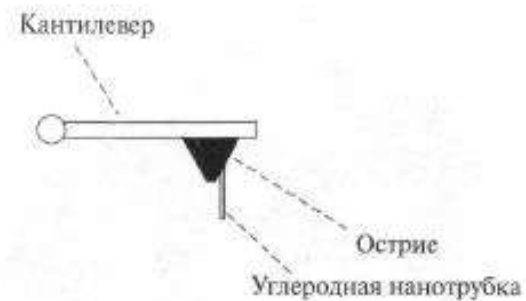


Рис. 5.37. Схема размещения однослойной нанотрубки на кантилере атомного силового микроскопа

Наноавтомобіль. Від ідеї до реалізації.

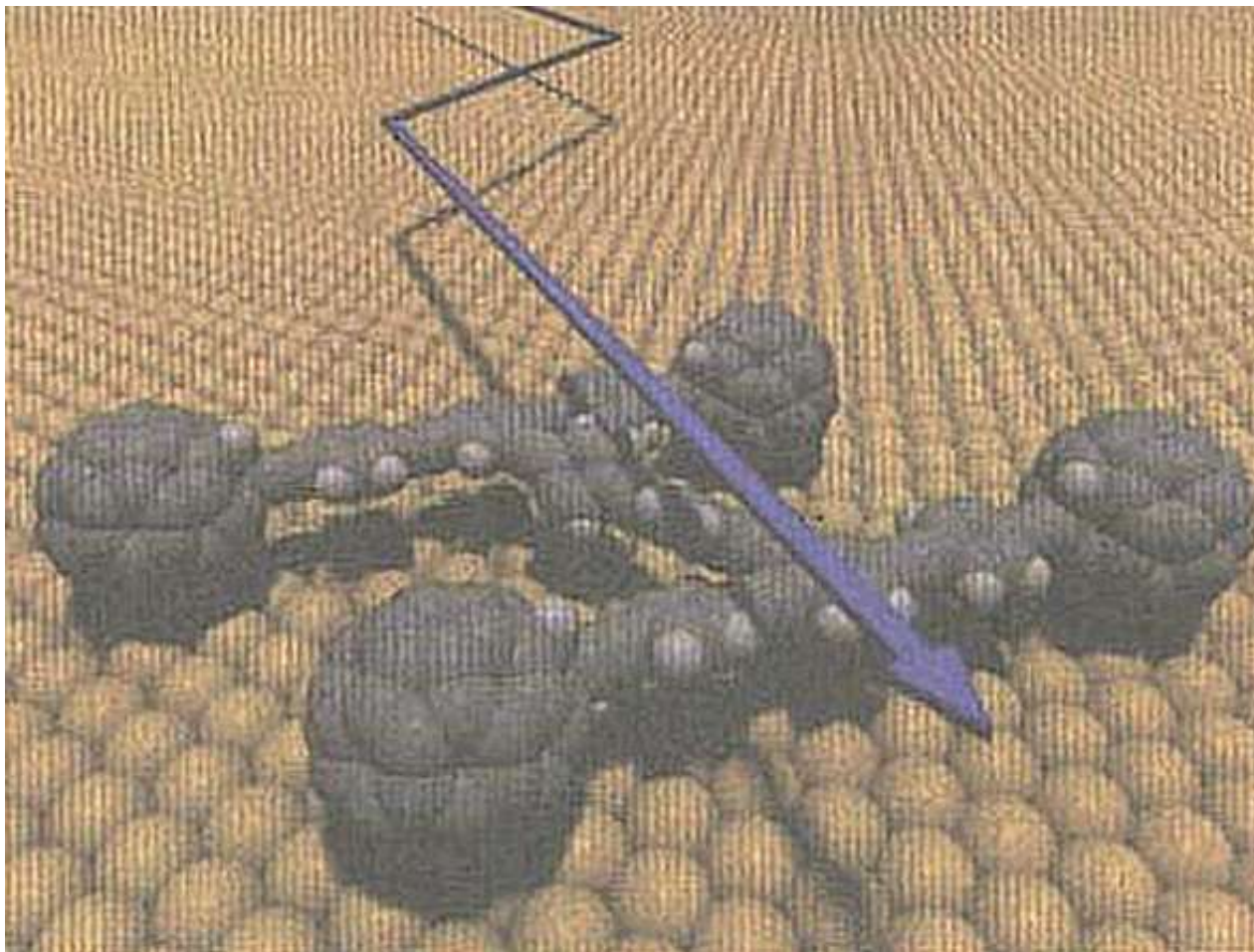


Рис. 4.8. Стрoєння наноавтомобиля

Експериментальний зразок

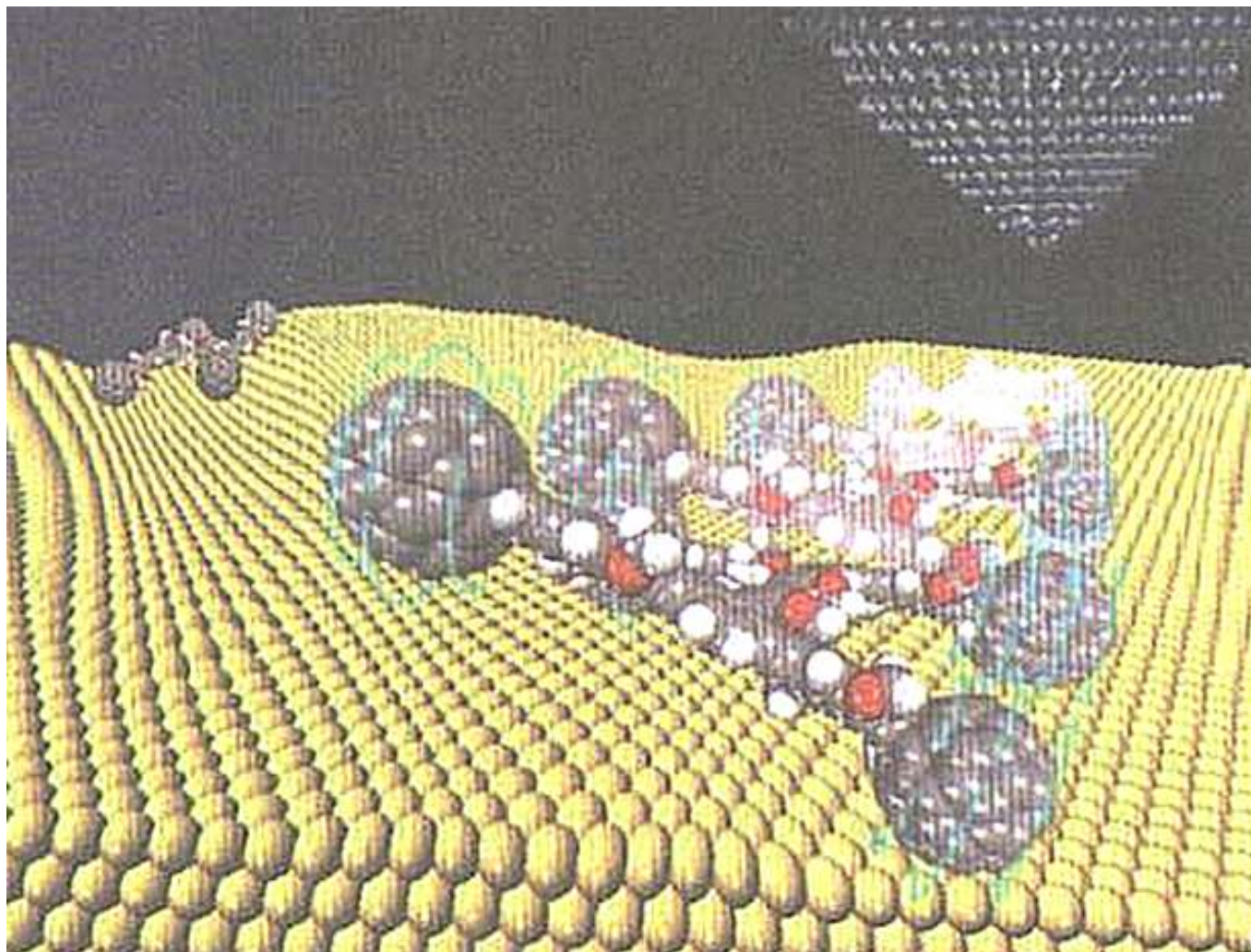


Рис. 4.9. Наномашина їздит на поверхно́сті из золота

Кроковый актюатор

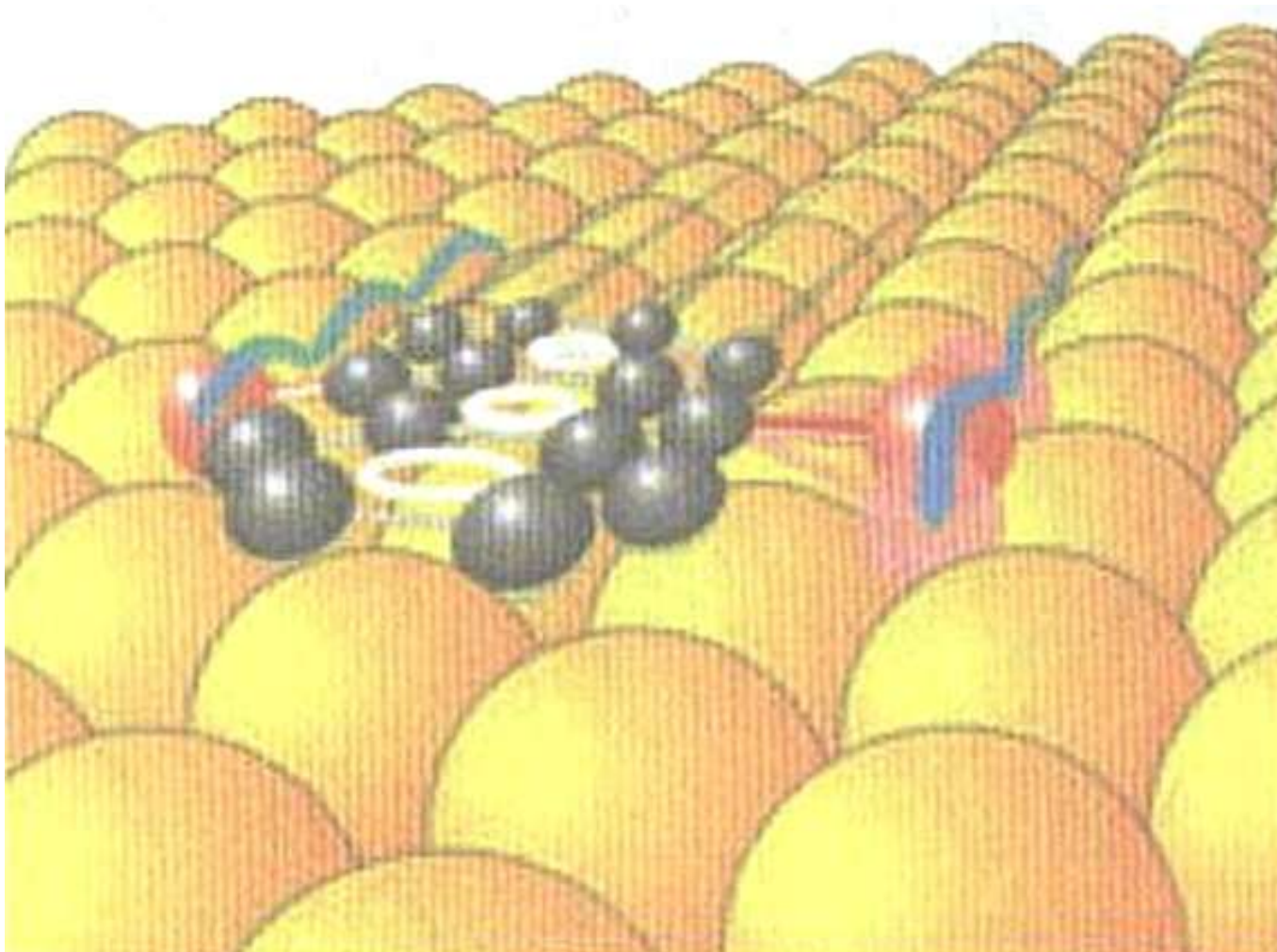


Рис. 4.24. Модель шагового актюатора на базе DTA

Неуглецеві нанотрубки

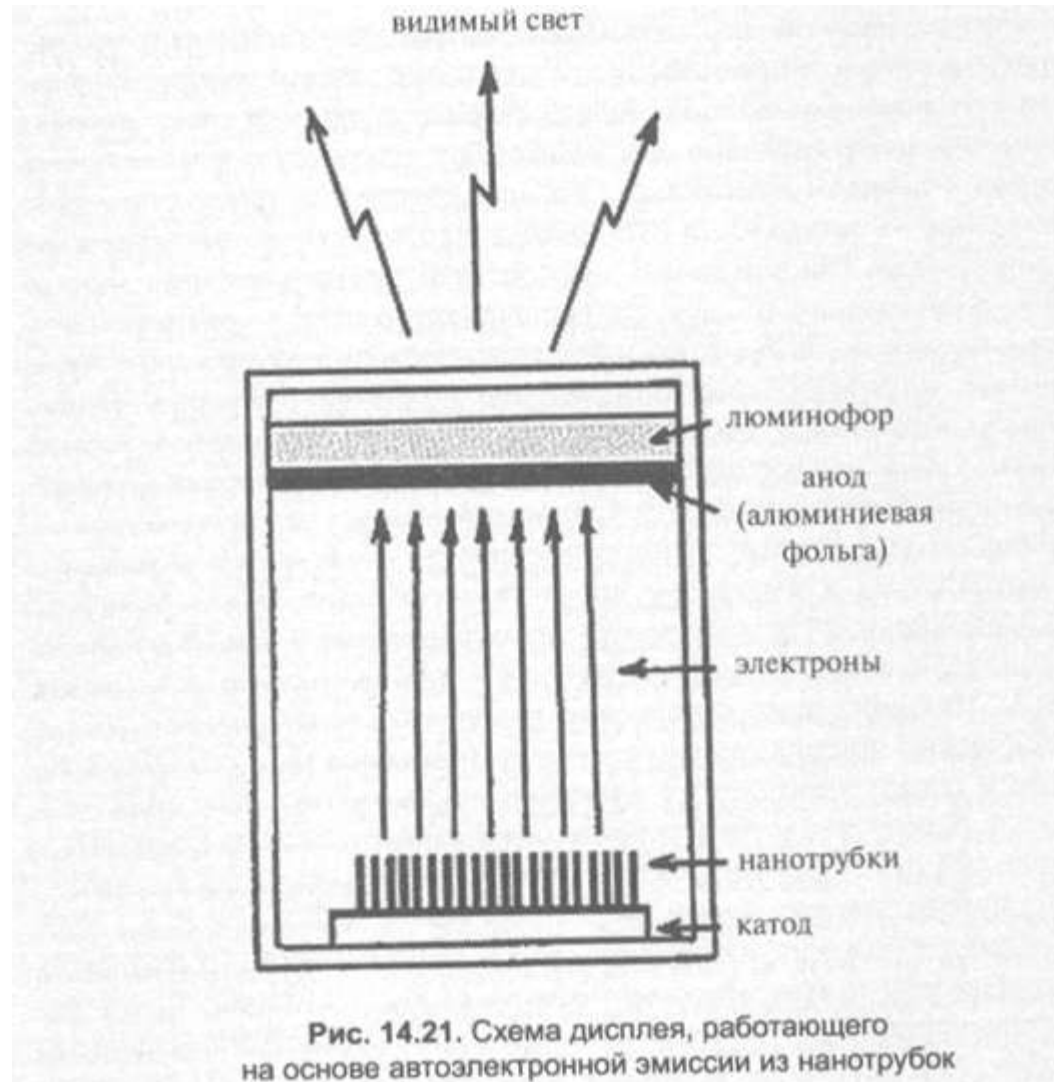
К числу неуглеродных нанотрубок, получивших широкое распространение, относятся нанотрубки составов B-C-N, C-N, B-N. Нанотрубки из нитрида бора BN подразделяются по форме на цилиндрические (спиралевидные, плавно изогнутые, в форме сростков по внешней поверхности, тройниковые); бамбукообразные (в виде последовательного сочетания цилиндрических нанотрубок переменного диаметра) и конические (в форме усеченных конусов, вставленных друг в друга).

Также широко распространены неуглеродные нанотрубки на основе халькогенидов MoS_2 , WS_2 , NbSe_2 , WSe_2 , MoTe_2 . Весьма перспективными в практическом отношении являются нанотрубки на основе дихлорида никеля NiCl_2 , имеющего слоистую структуру, особенностью которой является ферро – и антиферромагнитный типы спинового упорядочения внутри и между слоями соответственно, а также полупроводниковые нанотрубки на основе CuO , CuS , CdS , CdTe , ZnTe .

Особый интерес представляют многослойные полупроводниковые нанотрубки, в частности, двухслойные SiGe-нанотрубки, а также нанорулоны на основе InAs/GaAs и SiGe/Si .

На сьогодні все!
ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Дисплеї на основі вуглецевих трубок



Сенсоры на основі нанотрубок

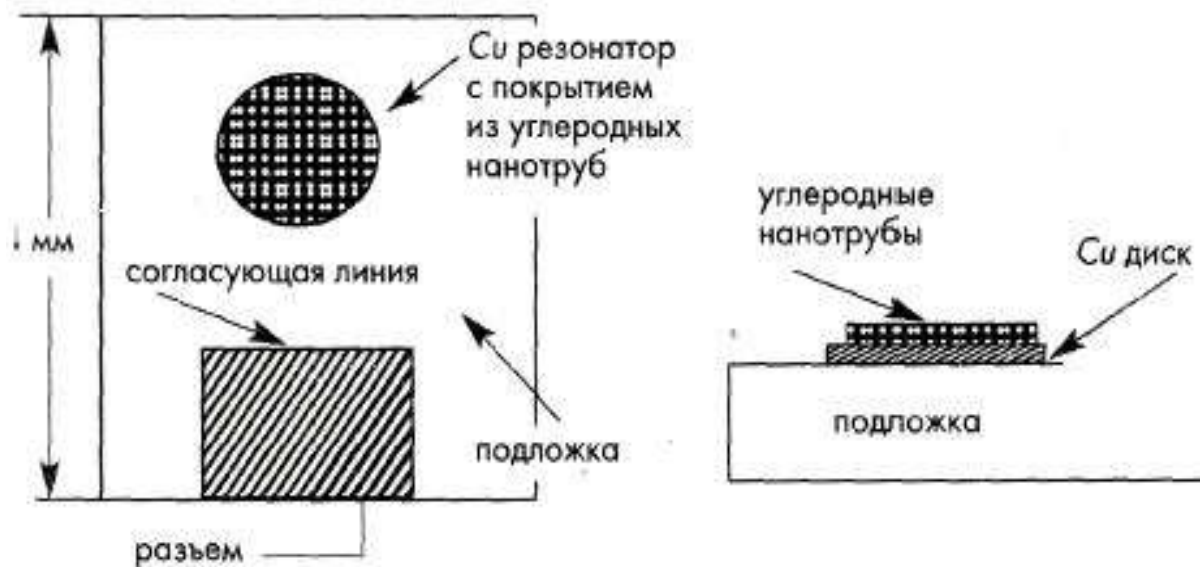
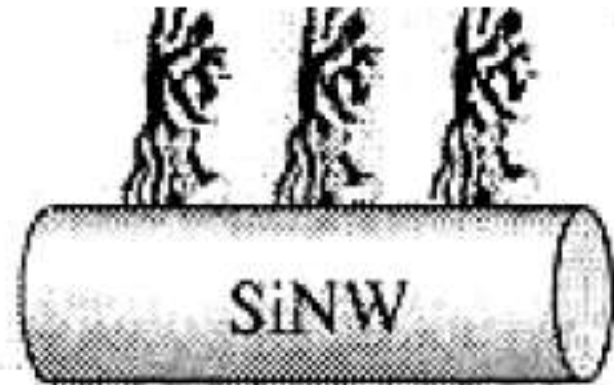
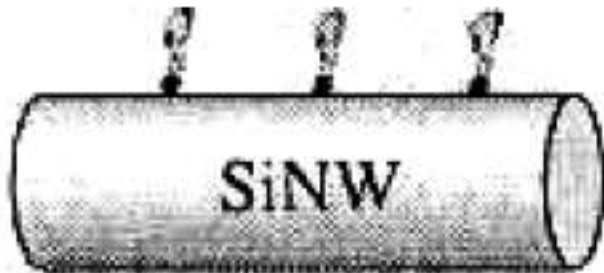


Рис. 5.49. Схема газового наносенсора, в котором адсорбция атомов газа на нанотрубках приводит к изменению частоты колебаний резонатора [6]

Квантові дротинки Si, вирощені методом лазерної абляції, що використовуються в якості сенсорів



Заповнені нанотрубки

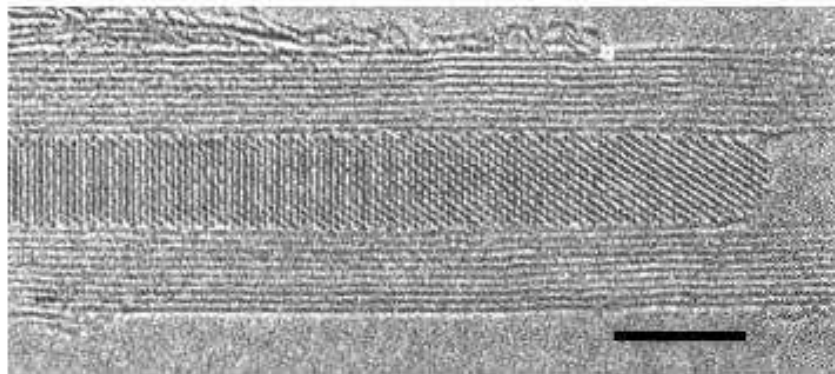


Рис. 5.54. Углеродная нанотрубка, заполненная оксидом самария Sm_2O_3 [6]
Масштабная метка 10 нм

Нанотрубки могут заполняться самыми разнообразными материалами, в том числе металлами (Rh, Pd, Pt, Mn, Co, Fe, Ni, Sc, La, V, Ce, Gd, Zr, Y, Ti и др.), а также их соединениями (рис. 5.54).

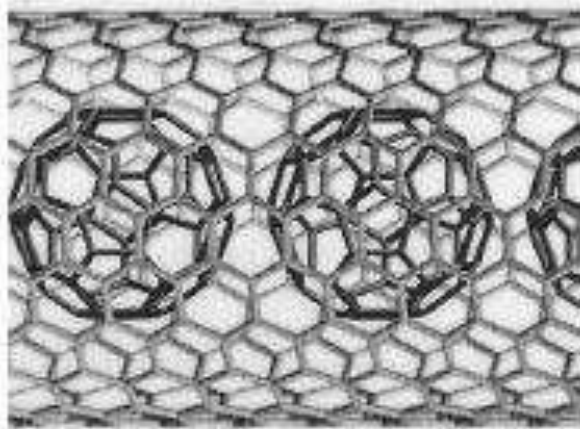


Рис. 5.57. Наноструктура, состоящая из углеродной нанотрубки и инкапсулированного в нее фуллерена C_{60} [13]

Нанотрубки могут быть использованы при изготовлении батареек на основе лития, который также можно помещать внутрь нанотрубок. К числу необычных примеров заполнения нанотрубок относится введение в них фуллеренов. В практическом отношении представляет интерес заполнение нанотрубок веществами биологической природы, в частности, лекарственными препаратами.

Нанотрубка заповнена надпровідником

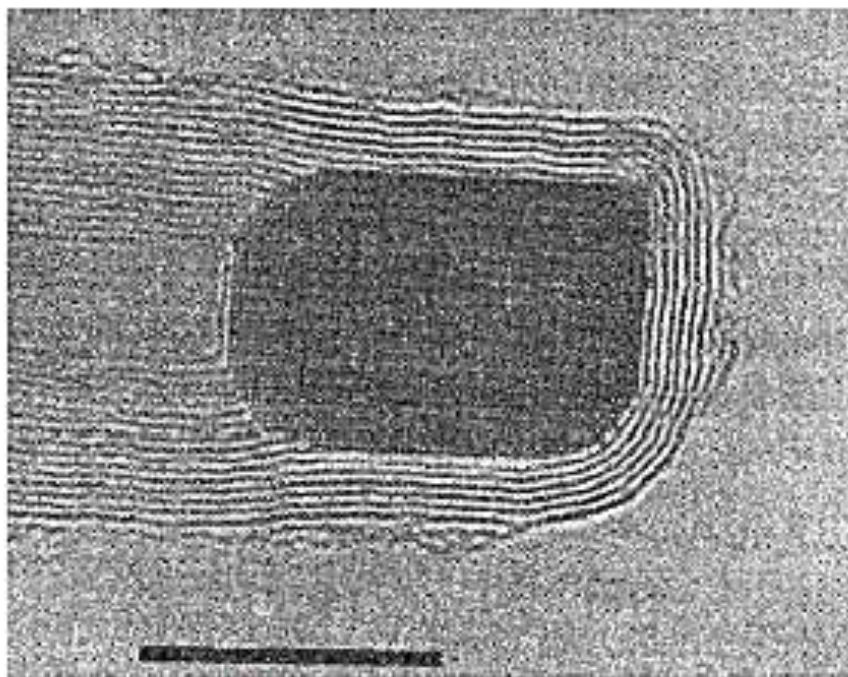


Рис. 5.55. Нанотрубное капсулирование
карбида тантала TaC
Масштабная шкала 10 нм

Схема електролітичної комірки для заповнення нанотрубок воднем

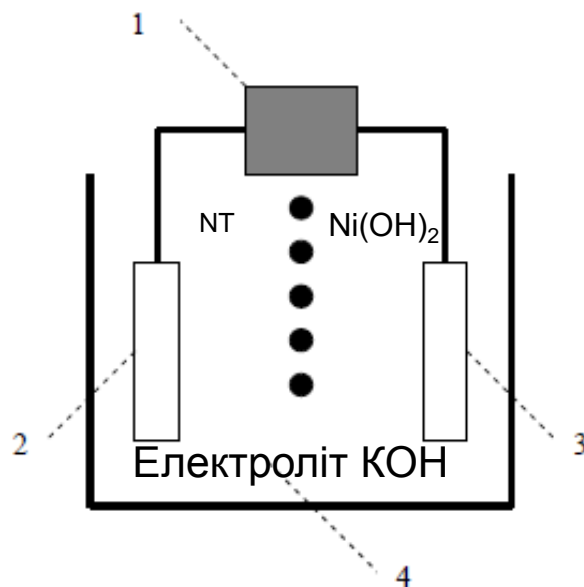


Рис. 5.56. Схема электрохимической ячейки для заполнения углеродных нанотрубок водородом

1 – источник питания, 2 – отрицательный электрод, покрытый углеродными нанотрубками, 3 – положительный электрод, 4 – электролит (водный раствор КОН)

Заповнені фулерени

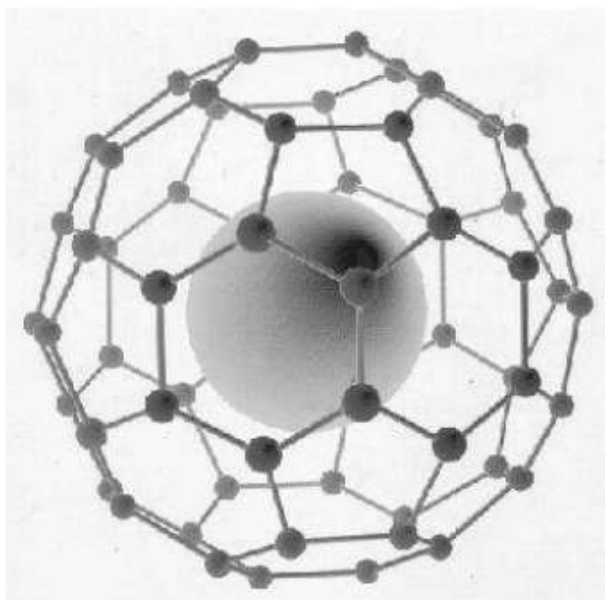


Рис. 5.9. Эндоэдральный комплекс
 La@C_{60}

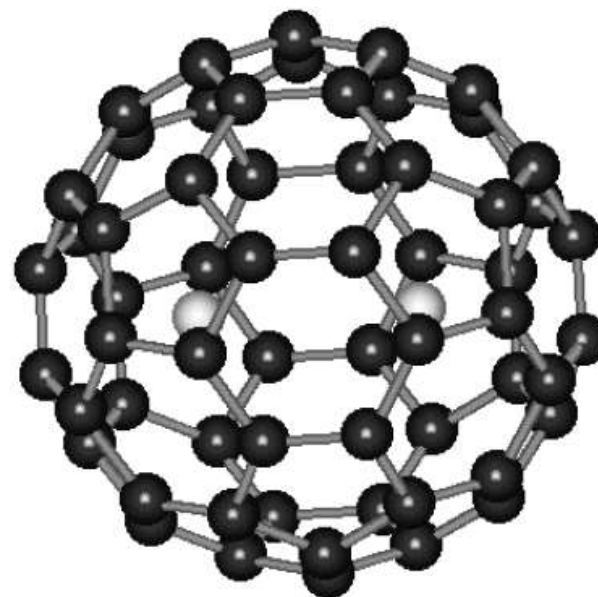


Рис. 5.10. Эндоэдральный комплекс
 $\text{Li}_2\text{@C}_{60}$

Легування фулеренів

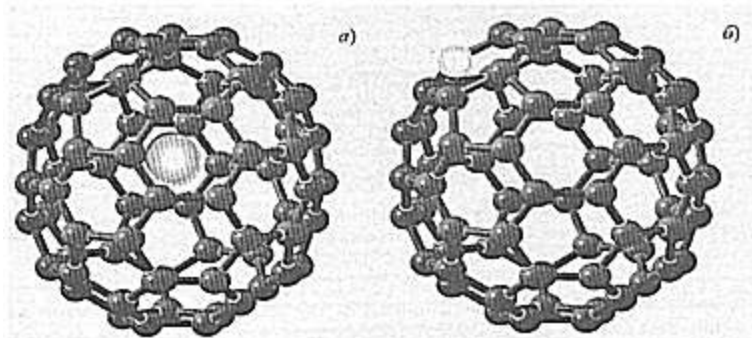


Рис. 15.2. Легирование фуллеренов: (а) внутреннее (эндифуллерены), (б) легирование замещением

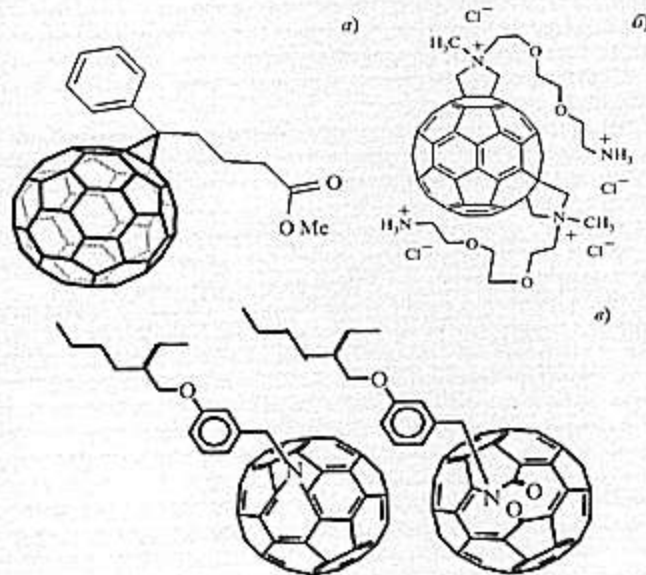


Рис. 15.3. Молекулярная структура производных C_{60} , которые используются в солнечных элементах: (а) метиловый эфир [6,6]-фенил- C_{61} -бутиловой кислоты (PCBM); (б) транс-3 C_{60} ; (в) азафуллероид; (г) кетолактам

Наношприцы

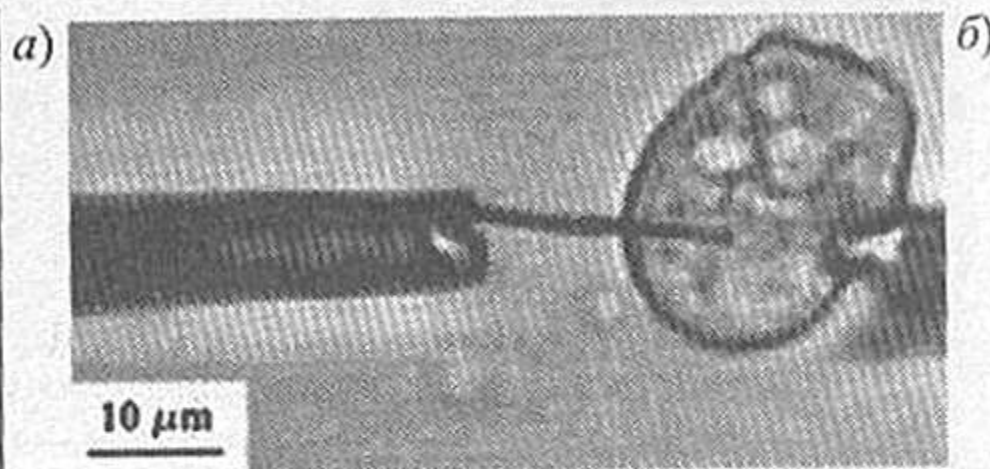
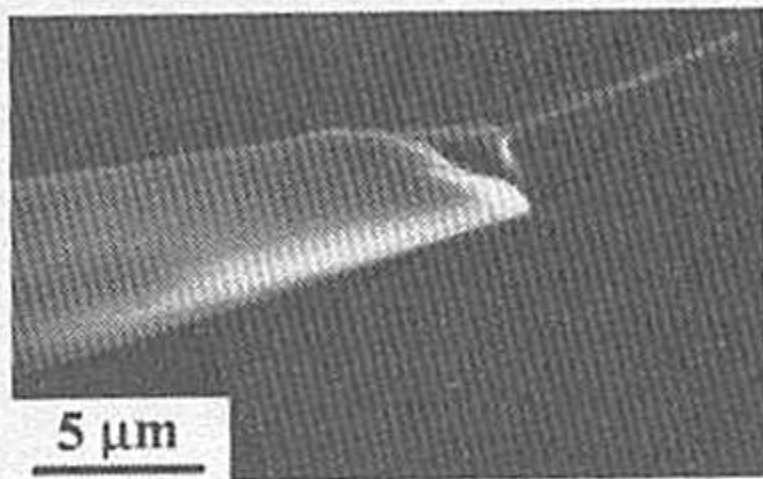


Рис. 14.22. (а) Пипетка с углеродной нанотрубкой на кончике. Соединение пипетки с трубкой герметично закреплено оптическим клеем. (б) Введение наношприца в клетку [115]