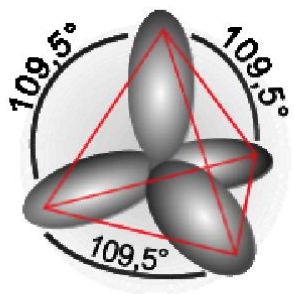


## **Лекція 14-15**

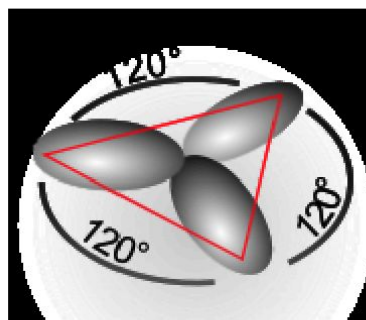
**Рисунки та таблиці)**

Таблиця 1 Алотропні модифікації карбону залежно від типу гібридизації

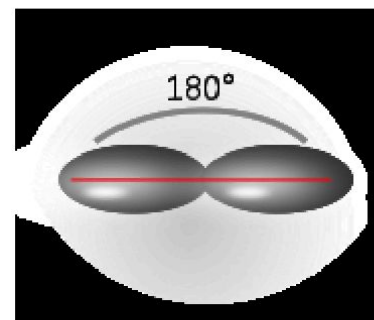
Карбон			
$sp^3$	$sp^2$	$sp$	$sp^3/sp^2$
Алмаз (кубічний), лонсдейліт (гексагональний алмаз)	Графіт, графен, фулерени, астралени, нанотрубки, нановолокна, скловуглець	Карбін	Аморфний вуглець



а



б



в

Рис. 1. Види гібридизації електронних оболонок: а -  $sp^3$ ; б -  $sp^2$ ; в -  $sp$

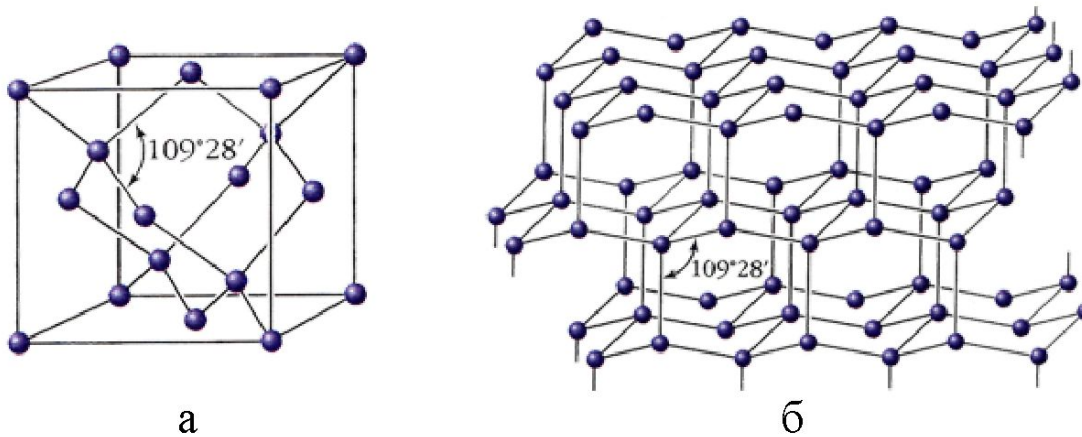


Рис. 2. Кристалічна ґратка кубічного (а) та гексагонального алмазу (б)

а аналогічний показник для алмазу – від 1000 до 2600 Вт/(м·К), залежно від чистоти кристалів.

Таблиця 2 Застосування алмазних матеріалів

Технічне застосування	Тип алмазного матеріалу	Імплантація
Зносостійкі покриття	Алмазні або алмазоподібні плівки	
Тепловідводи	Монокристали, полікристали, плівки	
Діоди, транзистори	Синтетичний алмаз, епітаксійні плівки	+
Лавинно-прольотні діоди	Кристали ідеальної структури	+
Детектори частинок и квантів, дозиметри	Природний і синтетичний алмаз, плівки	+
Ультрафіолетові випромінювачі	Монокристали і плівки	+
Інфрачервоні випромінювачі	Всі види алмазів	+
Термістори	Монокристали малих розмірів	+

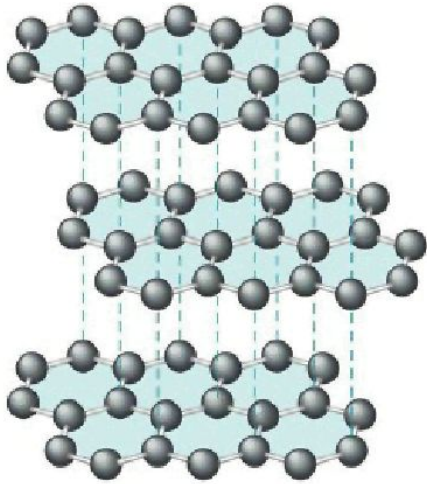


Рис 3. Кристалічна ґратка графіту

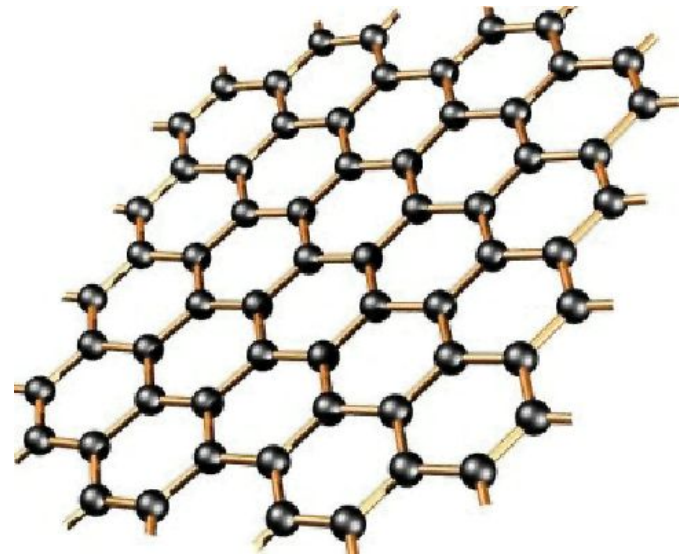


Рис. 4. Схематичне зображення графену

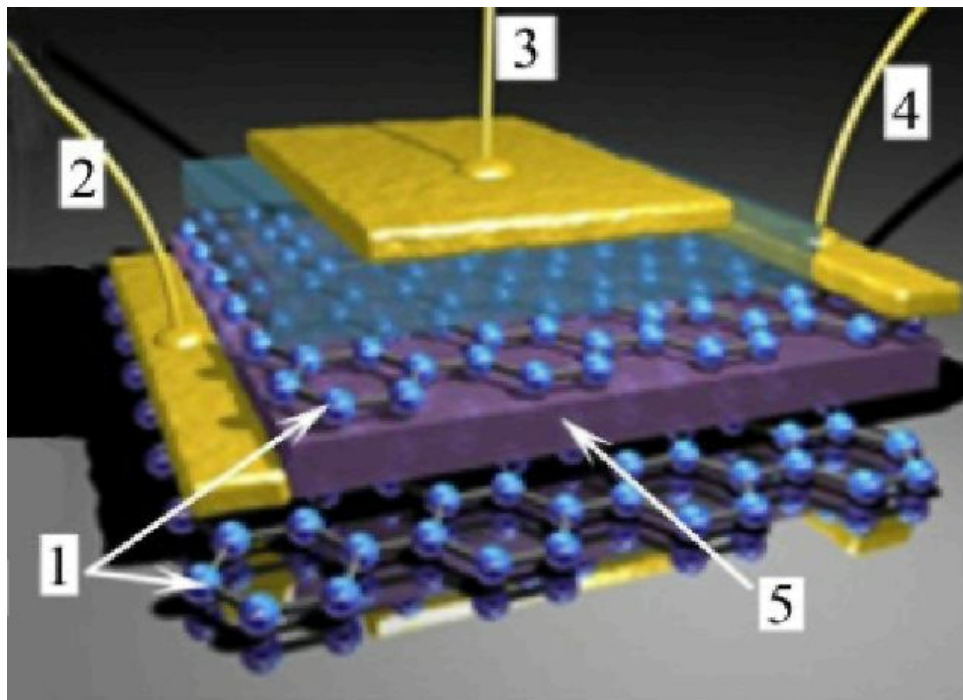
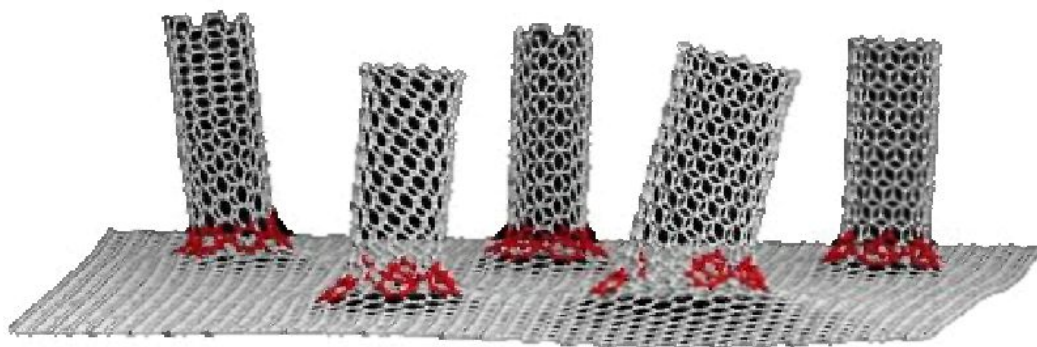
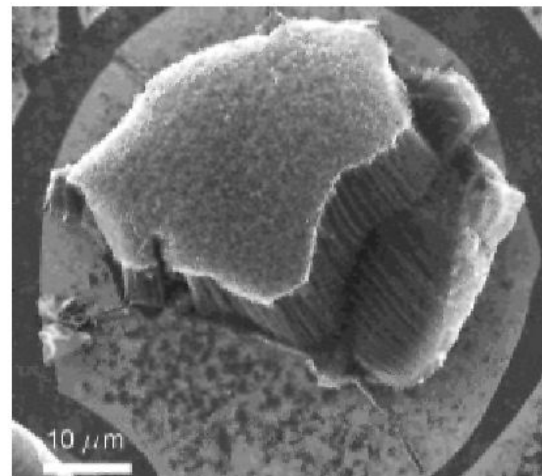


Рис. 5. Схематичне зображення вертикального польового транзистору на основі графену: 1 - шари графену; 2 - стік; 3 - керувальний електрод; 4 - витік; 5 - відокремлювальний шар діелектрика (BN або  $\text{MoS}_2$ ).

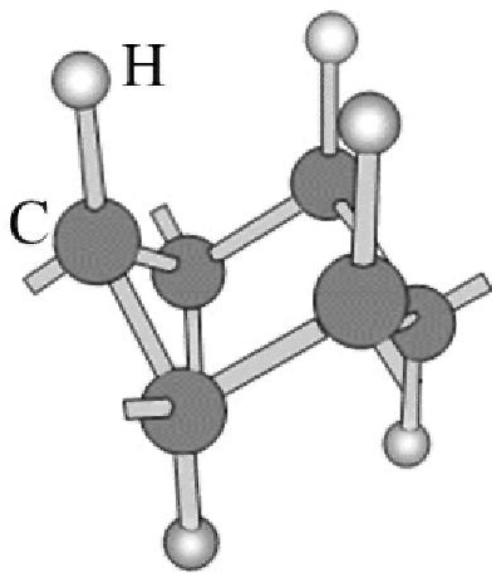


а

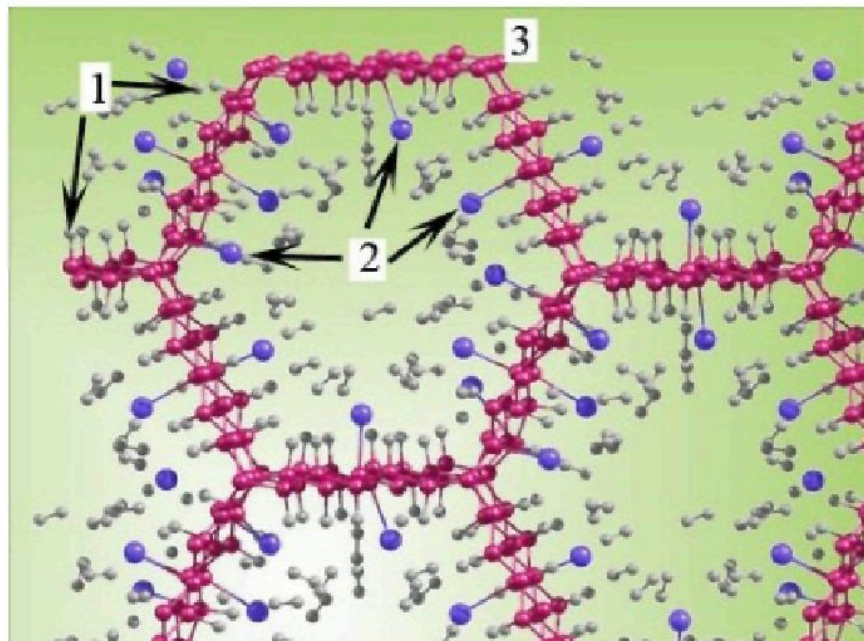


б

Рис. 6. Схематичне (а) та електронно-мікроскопічне (б) зображення нанотрубок вирощених на шарі графену з використанням безшовної технології



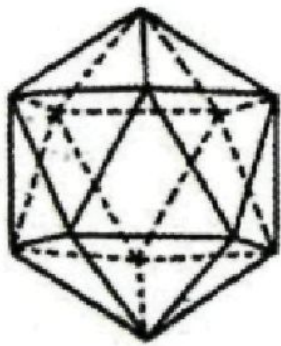
а



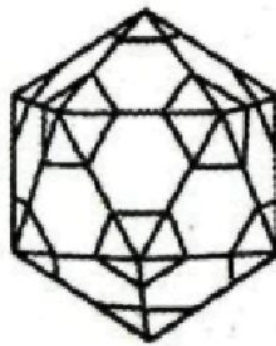
б

Рис. 7. Схематичне зображення кристалічної структури графану (а) та пористий матеріал на основі графану з приєднаними атомами лужних металів: 1 - атоми водню; 2 - атоми металу; 3 - вуглець (б).





а



б



в

Рис 8. Прозорий ікосаедр (а), ікосаедр із лініями відсікання вершин (б) та фулерен (в)

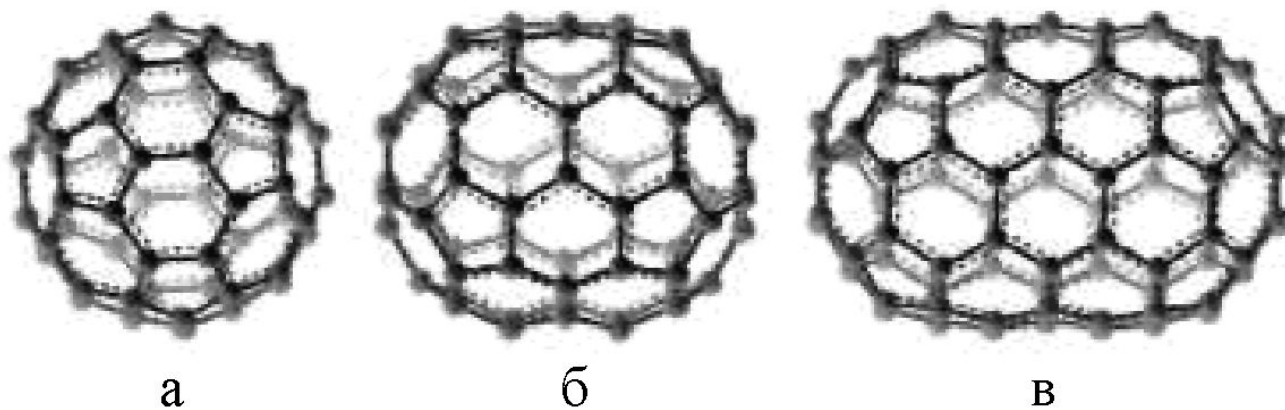
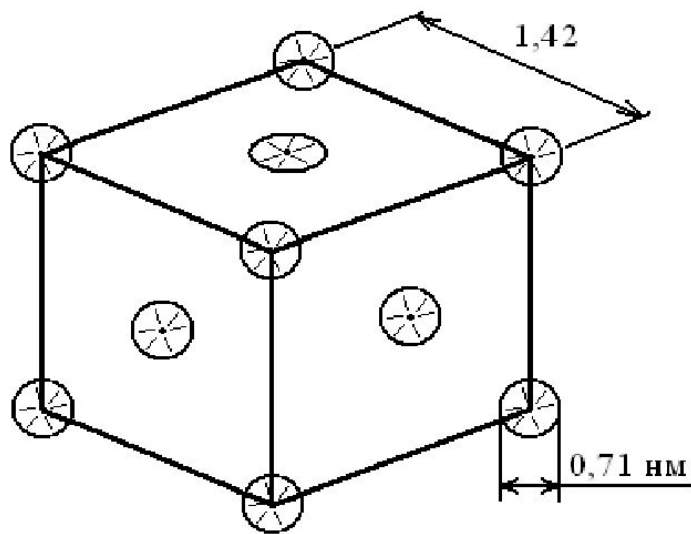
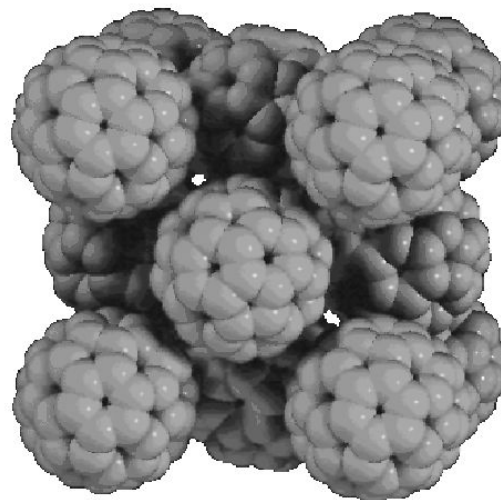


Рис 9. Зовнішній вигляд фулеренів: а - C<sub>60</sub>, б - C<sub>70</sub>, в - C<sub>90</sub>



а



б

Рис.10. Кристалічна ґратка фулериту: а – схематичне зображення; б – об'ємний вигляд



Рис. 11. Схема отримання фулеренів із графіту

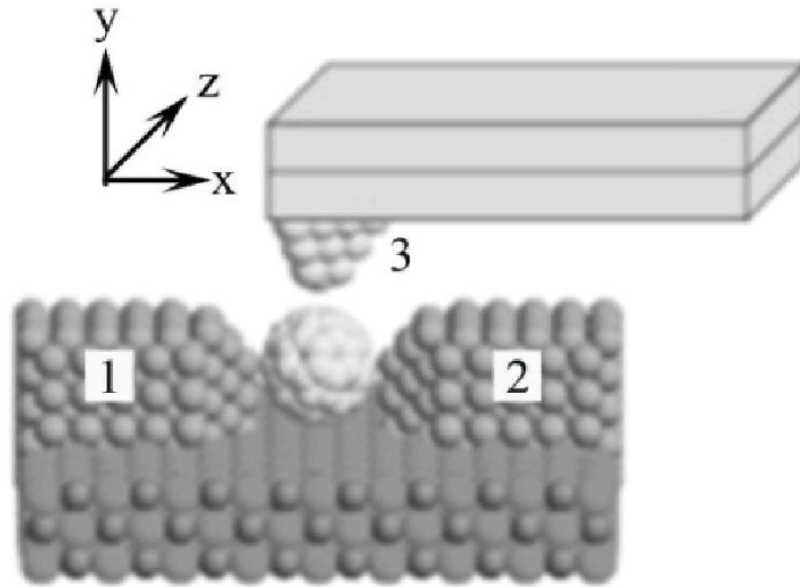


Рис. 12. Схематичне зображення польового транзистора з використанням молекули фулерену: 1 - стік; 2 - витік; 3 - кантилевер, що виконує функції затвора

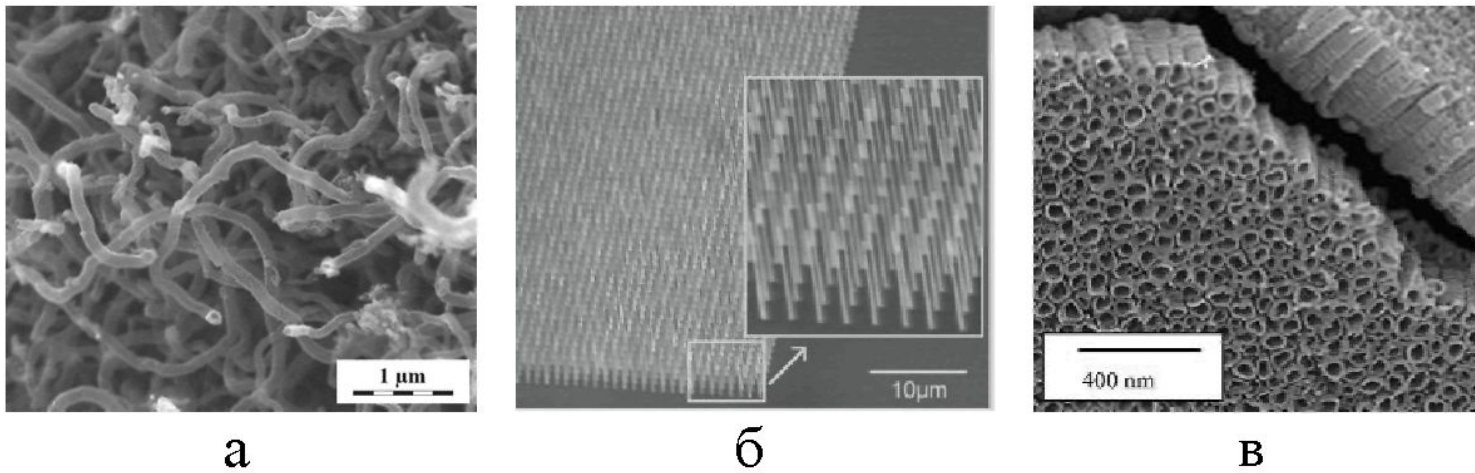
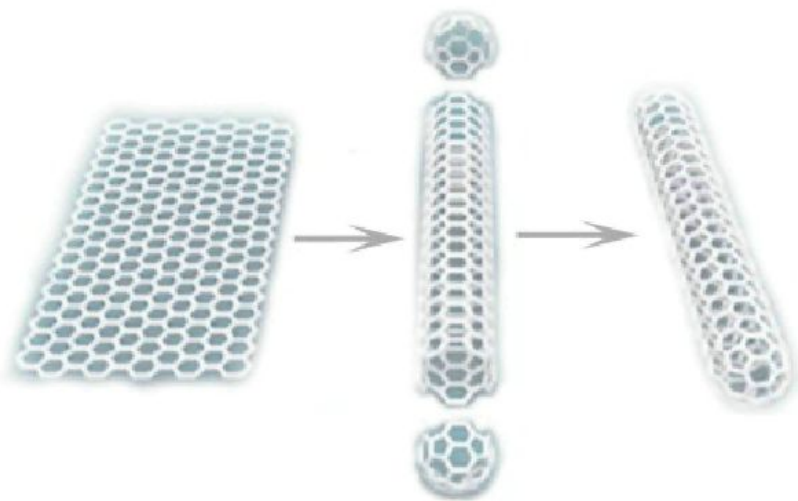
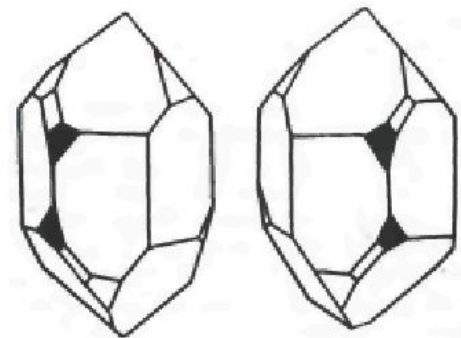


Рис. 13. Електронно-мікроскопічне зображення вуглецевої нонотрубки (а) та їх «ліс нанотрубок» (б, в)



а



б

Рис. 14. Схематичне формування закритої нанотрубки (а) та зображення правого і лівого кристалів кварцу (б)

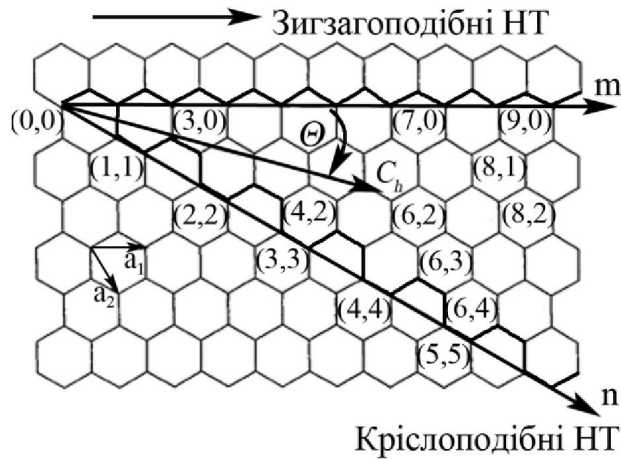


Рис. 15. Можливі індекси, вектори та кути хіральності одношарових вуглецевих нанотрубок

Базис графітового шару визначається за векторами  $a_1$  і  $a_2$  (рис. 15), а вектор хіральності ( $C_h$ ) можна подати сумою:

$$C_h = na_1 + ma_2, \quad \text{де } n \text{ і } m \text{ – цілі числа (індекси хіральності).}$$

Зв'язок між індексами хіральності ( $n$ ,  $m$ ) і кутом  $\Theta$  має такий вигляд:

$$\sin \Theta = \frac{3m}{2\sqrt{n^2 + nm + m^2}}.$$



Залежно від кута хіральності розрізняють такі типи вуглецевих нанотрубок (рис. 16):

- ахіральні зигзагоподібні ( $\Theta = 0^\circ$ ,  $C_h = (n, 0)$ );
- $\Theta$  ахіральні кріслоподібні (armchair) ( $\Theta = 30^\circ$ ,  $C_h = (n, n)$ );
- хіральні ( $0 < \Theta < 30^\circ$ ,  $C_h = (n, m)$ ).

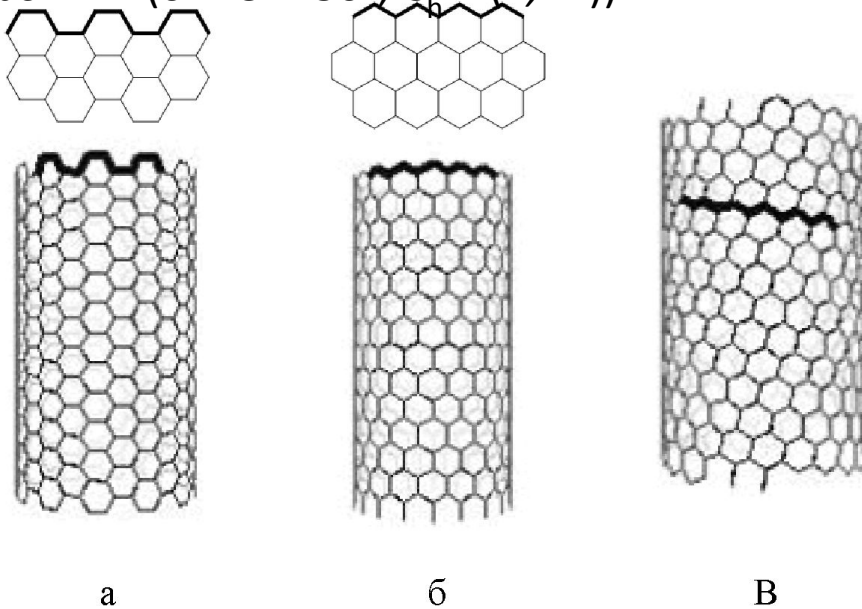


Рис. 16. Схематичне зображення ОВНТ типу крісло (12, 12) (а), зигзаг (18, 0) (б) та хіральні (20, 3) (в)

У випадку повного опису геометрії нанотрубки необхідно зазначити її діаметр. Індокси хіральності одношарової нанотрубки ( $n, m$ ) визначають її діаметр  $D$ :

$$D = \frac{\sqrt{3}d_0}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2},$$

де  $d_0 = 0,142$  нм - відстань між сусідніми атомами вуглецю у графітовій площині.

Діаметр одношарових вуглецевих нанотрубок знаходиться в діапазоні 0,3-5 нм

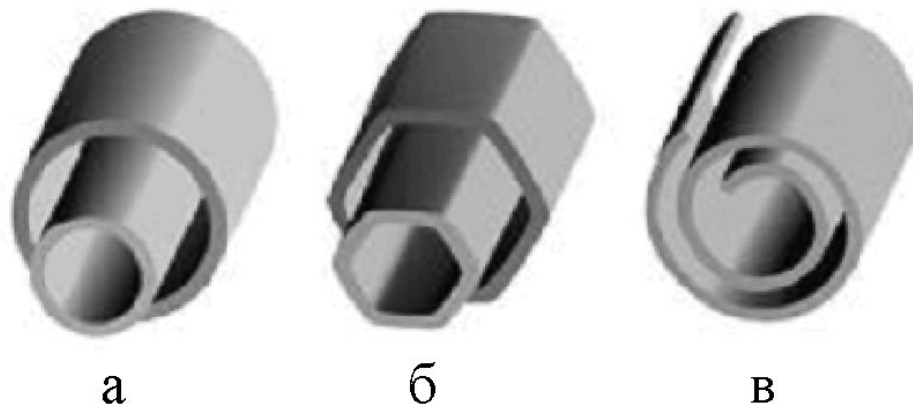


Рис. 17. Поперечний переріз БВНТ: а – матрешка; б – шестикутна призма; в – згорток

Відстань між шарами в бездефектних багат шарових вуглецевих трубках залежить від початкового діаметра нанотрубки ( $D_{\text{тр}}$ ) і зменшується в міру його збільшення:

$$d_c = 0,344 + 0,1 \cdot e^{-\frac{D_{\text{тр}}}{2}}, \text{ де } d_c - \text{відстань між шарами в багат шарових вуглецевих трубках}$$

Таблиця 3 Порівняння механічних властивостей одношарових вуглецевих нанотрубок (ОВНТ) та багатошарових вуглецевих нанотрубок (БВНТ)

Матеріал	Модуль Юга, ГПа	Межа міцності при розтягуванні, ГПа	Відносне подовження при розриві, %
ОВНТ <sup>Е</sup>	1-5	13-53	16
Крісло ОВНТ <sup>Т</sup>	0,94	126,2	23,1
Зигзаг ОВНТ <sup>Т</sup>	0,94	94,5	15,6-17,5
БВНТ <sup>Е</sup>	0,2-0,8-0,95	11-63-150	-
Нержавіюча сталь <sup>Е</sup>	0,186-0,214	0,38-1,55	15-50
Кевлар <sup>*</sup>	0,06-0,18	3,6-3,8	~ 2

Примітка: <sup>Е</sup> Експериментальні спостереження. <sup>Т</sup> Теоретичні дані. \* Кевлар – синтетичне волокно, що має високу міцність (у п'ять разів міцніше сталі, межа міцності  $\sigma_0 = 3620$  МПа)

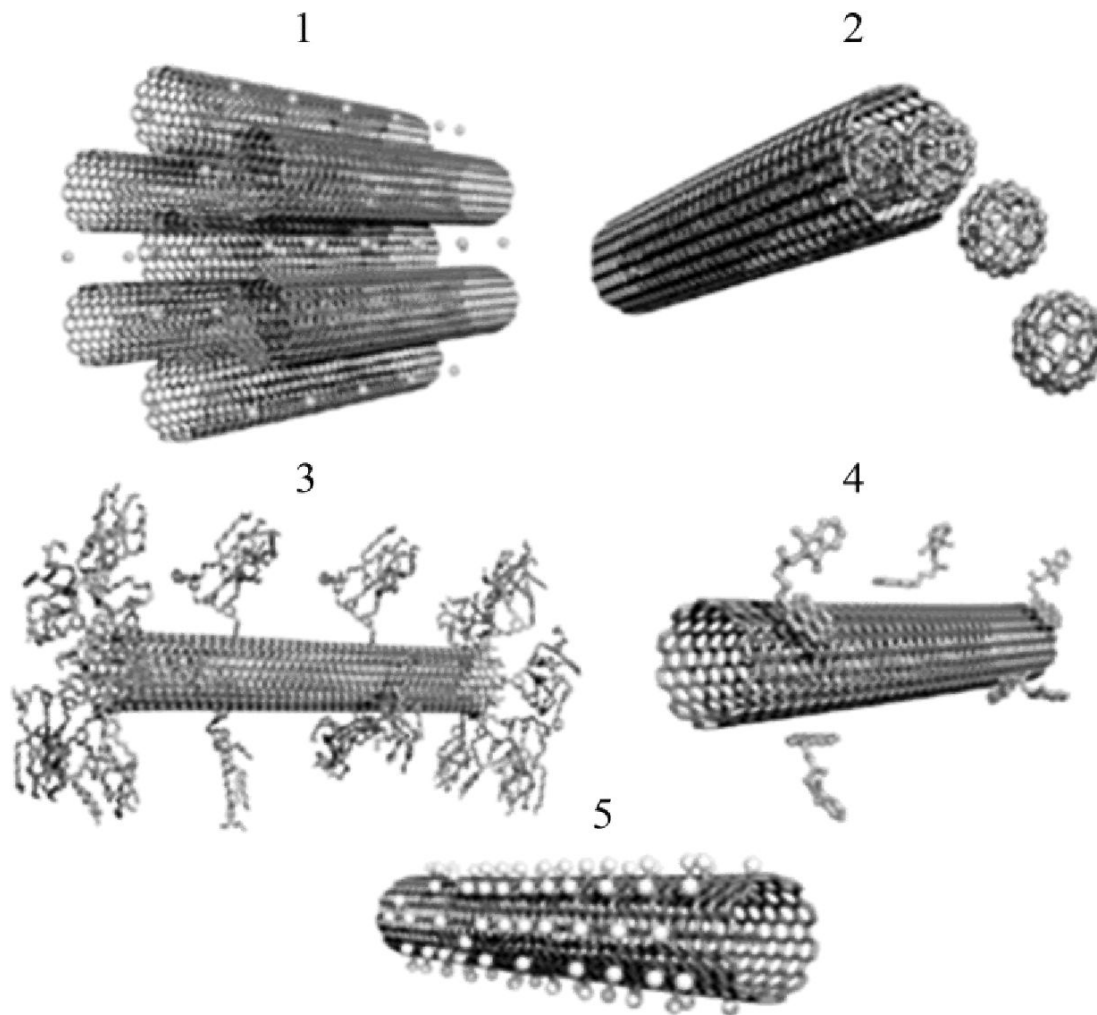


Рис. 18. Функціоналізовані нанотрубки: 1 - інохідні атоми в пучку нанотрубок; 2 - інкапсулювання частинок усередину ВНТ (підод - фулерени в нанотрубці); 3, 4 - ковалентна (3) та нековалентна (4) функціоналізація трубок; 5 - атомно-модифіковані нанотрубки (ВНТ модифікована атомами фтору)

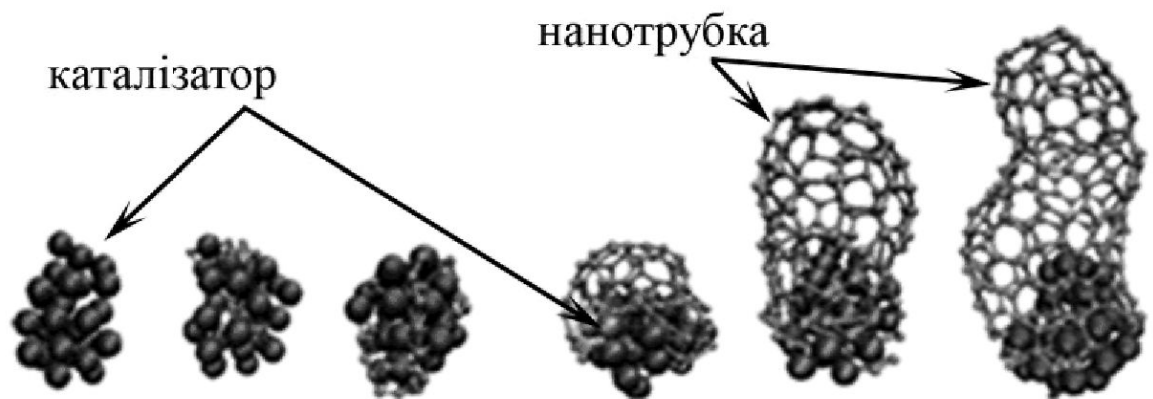


Рис. 19. Процес формування нанотрубки на каталітичній частинці

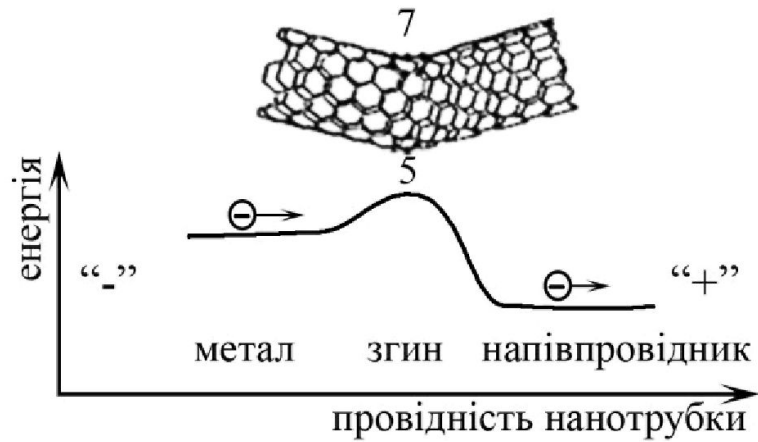


Рис. 20. Зміна типу провідності нанотрубки внаслідок її деформації шляхом впровадження в графітову сітку п'яти- і семикутника

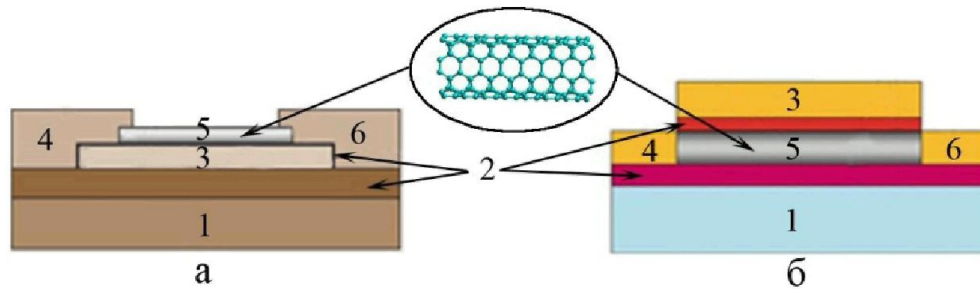


Рис. 21. Схематичне зображення польового транзистора на основі нанотрубки, з різним положенням затвору (а, б): 1 – підкладка (Si); 2 – ізолюючий шар; 3 – керуючий затвор; 4 – стік; 5 – нанотрубка; 6 – витік

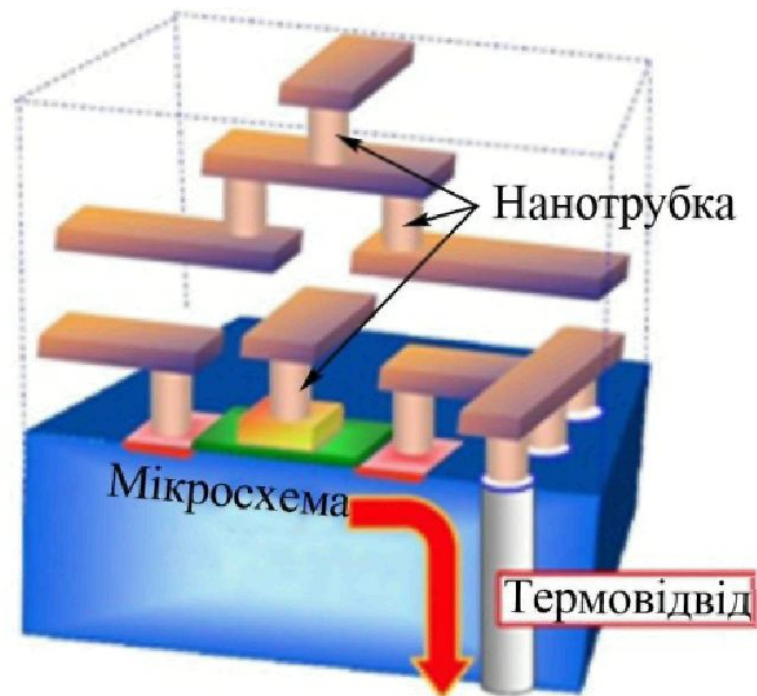


Рис. 22. Відведення тепла від Si кристалу за допомогою нанотрубок

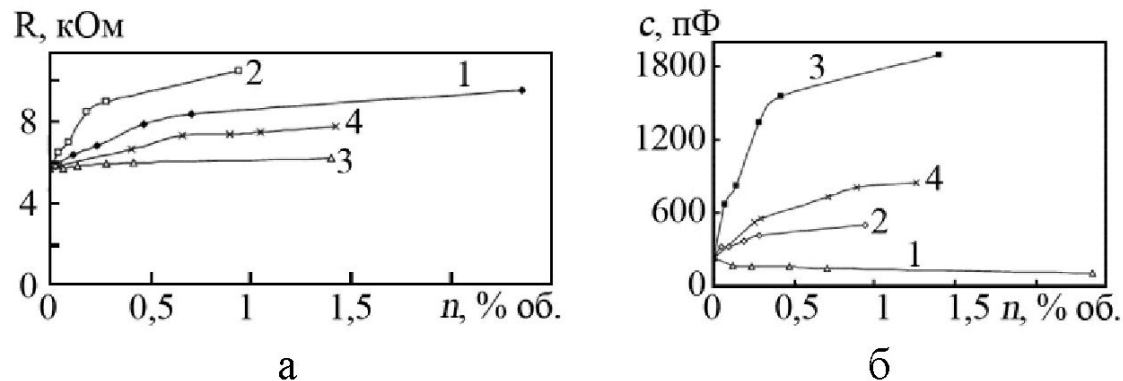


Рис. 23. Характеристики резистивного (а) та ємнісного (б) модуля сенсора від концентрації газів: 1 -  $CH_4$ ; 2 -  $CO_2$ ; 3 -  $H_2$ ; 4 -  $CO$

Таблиця 4. Вплив додавання багат шарових вуглецевих нанотрубок (БВНТ) на чутливість газового датчика

Матеріал	етанол		ацетон		пропанол	
	$T, ^\circ C$	$S$	$T, ^\circ C$	$S$	$T, ^\circ C$	$S$
$SnO_2$	120-400	1,55	260	1,43	330	1,7
$SnO_2$ :БВНТ	330	8	360	12,5	320	17