



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для практичних занять і самостійної роботи студентів з дисципліни «Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні» для студентів спеціальності 171 «Електроніка» освітньої програми «Комп'ютерні технології та наноматеріали в електроніці» денної форми навчання

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| | С. |
| Практична робота 1: «Класифікація та методи отримання нанорозмірних матеріалів»..... | 3 |
| Практична робота 2: «Магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем»..... | 5 |
| Практична робота 3: «Алмазні та алмазоподібні матеріали на основі вуглецю»..... | 11 |
| Практична робота 4: «Методи отримання та застосування матеріалів, споріднених алмазоподібним» | 13 |
| Практична робота 5: «Методи отримання, кристалічна структура і властивості фулеренів» | 15 |
| Практична робота 6: «Застосування нанотрубок»..... | 17 |
| Практична робота 7: «Наномеханіка і нанобіоелектроніка»..... | 24 |

Практична робота 1: «Класифікація та методи отримання нанорозмірних матеріалів»

Питання

1. Огляд доповіді Р. Фейнмана 1959 року.
2. Наноматеріали у порівнянні з масивними матеріалами.
3. Застосування сучасних досягнень нанотехнологій.
4. Нанотехнології та їх зв'язок з іншими галузями науки.
5. Функціональне значення нанопорошків.
6. Класифікація наноматеріалів.
7. Нанотехнології та їх зв'язок з іншими галузями науки.
8. Спінтроніка – напрям наноелектроніки.
9. Наномеханіка (наноробототехніка).
10. Нанотехнології в медицині. Нанобіологія.

Питання для самостійного опрацювання

1. Методи дослідження наноматеріалів:
 - атомно-силова мікроскопія;
 - електронно-просвічуюча мікроскопія;
 - рентгенографічний аналіз;
 - оже-спектроскопія;
 - скануюча-тунельна мікроскопія.
2. Самоорганізація наноматеріалів.
3. Наноматеріали: користь чи небезпека?

Рекомендована література

1. Проценко І. Ю. Прилади та методи дослідження плівкових матеріалів, Навчальний посібник з грифом МОНУ / І. Ю. Проценко, А. М. Черноус, С. І. Проценко. – Суми : СумДУ, 2007. – 264 с.
2. Елисеев А. А. Функциональные наноматериалы / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 456 с.

3. Демецька О. В. Проблема безпеки при використанні нанотехнологій / О. В. Демецька // Довкілля та здоров'я. – 2010. – №4. – С.8–12.
4. Наноматериали. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Б. М. Балоян, А. Г. Колмаков, М. И. Алымов и др. – Москва : Международный университет природы, общества и человека «Дубна», филиал «Угреша», 2007. – 125 с.
5. Ковшов А. Н. Основы нанотехнологии в технике / учеб. пособие. – А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров, И. М. Ибрагимов : Москва : МГОУ, 2006. – 244 с.
6. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк и др. – Харьков : ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. – 209 с.
7. Гусев А. И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях // УФН. – 1998. – Т. 168, № 1. – С. 55–83.

Практична робота 2: «Магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем»

Питання

1. Нанорозмірні плівкові системи: багаточарові плівки і мультишари.
2. Явище гігантського магнітоопору.
2. Спін-вентильні структури.
3. Застосування ГМО ефекту в приладах електроніки.
4. Сучасні електронні прилади: спін-вентильні структури, тонкоплівкові транзистори, органічні світловипромінюючі діоди.
5. Спіновий транзистор: класифікація, структура, робочі параметри і характеристики.
6. Чому змінюється опір в антиферомагнітних плівкових системах. Осциляційна залежність немагнітного прошарку на явище ГМО. У чому полягає різниця між МО, ГМО і ТМО.
7. Явище антиферомагнітного упорядкування, вплив магнітного поля на величину електричного опору системи. Приколотий і не приколотий спін-клапан. У чому полягає різниця між МО, КМО і ГМО.
8. Чому в магнітному полі змінюється електричний опір матеріалу? Антиферомагнітні мультишари і спін-клапанні структури. Застосування явища ГМО.

Теоретичний матеріал

Під дією зовнішнього магнітного поля траєкторія електронів провідності змінюється внаслідок дії сили Лоренца:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

де q і v – заряд і швидкість електрона, B – величина прикладеного магнітного поля, α – кут між векторами швидкості заряду та магнітної індукції.

У випадку тонкоплівкових матеріалів відбувається зміна середньої довжини вільного пробігу електронів (СДВП), коефіцієнтів дзеркальності, відбиття, проходження межі зерна та інтерфейсу, що приводить, в першу чергу, до зміни електричного опору. Радіус кола, по якому рухається заряджена частинка в площині, перпендикулярній магнітному полю B називається радіусом Лармора, і описується рівнянням:

$$r_L = \frac{m \cdot v}{q \cdot B},$$

де m – маса зарядженої частинки.

Енергія Фермі - енергія найвищого заповненого одночастинкового стану в системі ферміонів при температурі абсолютного нуля. Якщо забрати всю можливу енергію з металу шляхом охолодження до температури абсолютного нуля (0 Кельвінів), електрони в металі все одно будуть рухатися далі; при чому найшвидші з них будуть мати швидкості, які відповідають кінетичній енергії, рівній енергії Фермі - це і є швидкість Фермі. Енергія Фермі є однією з найважливіших концепцій у фізиці конденсованого стану, вона використовується, наприклад, при описі металів, діелектриків та напівпровідників.

При абсолютному нулі температури $T = 0$ всі заповнені стани (найнижчі енергетичні рівні) розміщені в сфері, що називається поверхнею Фермі, радіус якої визначається числом $z \cdot N$ вільних (валентних) електронів (N - число атомів, z - їх валентність):

$$2 \frac{(4/3)\pi p_F^3}{(2\pi\hbar)^3 / V} = z \cdot N,$$

де $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ (Дж·с) – стала Дірака, p_F – імпульс Фермі, V – об'єм металевого кристалу.

Швидкість електрона по поверхні Фермі визначається рівністю:

$$v_F = \frac{p_F}{m} = \frac{\hbar}{m} (3\pi^2 n)^{1/3},$$

де n – концентрація електронів, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – маса електрона.

Концентрація атомів в металах знаходиться в межах 10^{28} – 10^{29} м⁻³, у напівпровідниках їх кількість набагато менша, наприклад, $n_{Si} = 5,81 \cdot 10^{15}$ м⁻³, $n_{Ge} = 2,5 \cdot 10^{19}$ м⁻³. Для металевого зразка концентрація атомів можна знайти за виразом:

$$n = \frac{N_A \cdot \rho}{M},$$

де N_A – стала Авогадро, ρ – густина, M – молярна маса речовини.

Гігантський магнітоопір, (ГМО) – квантово-механічний ефект, що спостерігається у металевих плівках, які складаються з феромагнітних і провідних немагнітних шарів. Ефект полягає у значній зміні електричного опору таких структур при зміні взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів (рис. 2.1). Напрямок намагніченості можна керувати за допомогою зовнішнього магнітного поля. В основі ефекту лежить розсіяння електронів, що залежить від напрямку спіну. Величину ГМО прийнято вимірювати у відсотках і розраховувати за формулою:

$$ГМО = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)},$$

де $R(H)$ та $R(0)$ – опір зразка у зовнішньому магнітному полі та при його відсутності.

Взаємна орієнтація магнітних моментів двох сусідніх магнітних шарів залежить від товщини проміжного немагнітного шару, і коливається від паралельної (ферромагнетик) до антипаралельної (антиферромагнетик), як функція товщини немагнітного шару. Це явище називається осцилюючою обмінною взаємодією. В результаті такого зв'язку МО коливається при зміні товщини немагнітного шару. Товщину шарів, як

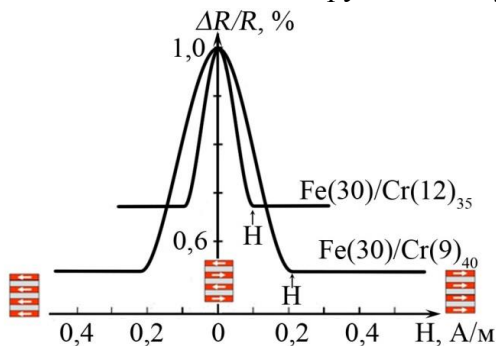


Рис. 2.1. Ефект ГМО, що реалізується в плівковій системі $\text{Fe}(30 \text{ \AA})/\text{Cr}(x)_n/\Pi$: $x = 9, 12 \text{ \AA}$

правило, вибирають виходячи з того, щоб у кожному шарі відстань, на якій електрон зберігає певну орієнтацію спіну, була набагато більшою за товщину цього шару. Така умова звичайно добре виконується при товщинах менших 10 нм і визначається експериментальним шляхом.

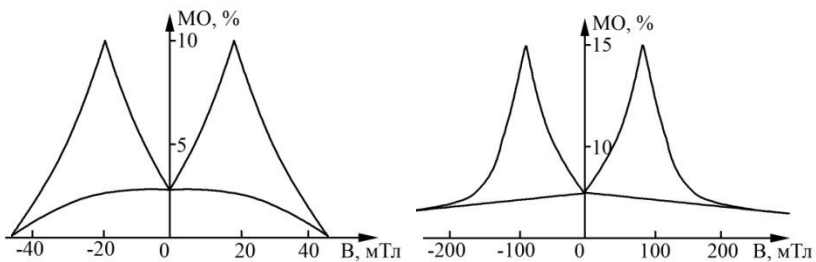
Задачі для розв'язання

Задача 1. ГМО плівкового зразка із шириною 0,2 мм та довжиною 0,5 см складає 70 %. Розрахувати товщину плівкової системи, якщо опір насичення становить 38 Ом. Питомий опір всієї системи складає $7,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Задача 2. Розрахувати радіус кривизни електрона для залізного зразка при магнітних полях: $B = 0,01; 0,2; 0,3; 0,5; 0,8; 1$ Тл. Вважати, що електрон рухається по поверхні Фермі.

Вектор магнітної індукції спрямовано перпендикулярно зразку. Молярна маса та густина заліза $56 \cdot 10^{-3}$ кг/моль та $7,87$ г/см³ відповідно. Побудуйте графік залежності величини радіуса від магнітної індукції.

Задача 3. Із наведених залежностей визначити величину коерцитивної сили, поле насичення і позначити стрілочками зміну опору у залежності від прикладання поля. Позначити як буде змінюватися орієнтація магнітних моментів плівкової системи.



Задача 4. Визначити чутливість магніторезистивного датчика, якщо швидкість електрону по кривій дорівнює $v = 1,46 \cdot 10^6$ м/с, а радіус кривизни $8,28$ м та $6,37$ мкм при мінімальному та максимальному значенні магнітного поля. Магнітоопір датчика становить 30% .

Задача 5. Розрахувати силу Лоренца та радіус Лармора металевого плівкового зразка при величині магнітного поля $0,5$ мТл:

| Матеріал | Pd | Cu | Fe |
|----------------------------|-------|------|------|
| Густина, г/см ³ | 12,02 | 8,93 | 7,87 |
| Молярна маса, г/моль | 106 | 64 | 56 |

Задача 6. Опір плівкової системи із антиферомагнітним упорядкуванням в $1,6$ разів більший при відсутності магнітного поля ніж у магнітному насиченні. Розрахувати величину гігантського МО.

Задача 7. При накладанні зовнішнього магнітного поля опір плівкової системи зменшився в 5 разів. Визначити магнітну чутливість, якщо початковий період обертання електрону та електричний опір становлять $T = 3,57 \cdot 10^{-9}$ с та 26 Ом. Магнітне поле збільшується в 50 разів.

Задача 8. Питомий опір плівкової системи становить $3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, а швидкість електронів $v = 1,3 \cdot 10^6$ м/с. Визначити радіус кривизни електрону, якщо зовнішнє магнітне поле відсутнє.

Рекомендована література

1. Однодворець Л. В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів в умовах фазоутворення : монографія / Л. В. Однодворець, С. І. Проценко, А. М. Черноус; за заг. ред. проф. І. Ю. Проценка. – Суми : СумДУ, 2011. – 203 с.
2. Основи спінтроники: матеріали, прилади та пристрої / Ю. А. Куницький, В. В. Курилюк, Л. В. Однодворець та ін. – Суми : СумДУ, 2013. – 127 с.
3. Магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових систем із можливим спін-залежним розсіюванням електронів / І. Ю. Проценко, І. В. Чешко, Л. В. Однодворець та ін. // Успехи. физ. мет. – 2013. – Т. 14. – С. 229–255.
4. Проценко І. Ю. Явище гігантського магнітного опору в багатошарових плівкових системах (огляд) / І. Ю. Проценко, І. В. Чешко, Я. Яворский // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2004. – № 10 (69). – С. 65–81.

Практична робота 3: «Алмазні та алмазоподібні матеріали на основі вуглецю»

Питання

1. Алотропні модифікації карбону.
2. Перспективний матеріал нанотехнологій – графен.
3. Методи отримання наноалмазів.
4. Будова та структурні характеристики полікристалічних алмазних плівок.
5. Емісійні властивості алмазоподібних плівок.
6. Утворення алмазоподібних (*a*-C) покриттів.

Питання для самостійного опрацювання

1. Застосування алмазоподібних плівок.
2. Діаграма стану системи графіт-алмаз.

Рекомендована література

1. Проценко І. Ю. Основи матеріалознавства наноелектроніки / І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. – Суми : СумДУ, 2004. – 108 с.
2. Литовченко В. Г. Алмазоподібні вуглецеві плівки - основа створення електронних приладів нового покоління / В. Г. Литовченко // ФТТ. – 2004. – Т. 5, № 1. – С. 9–15.
3. Поликристаллические алмазные пленки, выращиваемые методом химической транспортной реакции на чужеродных подложках / Н. Д. Самсоненко, Н. И. Носанов, С. Н. Самсоненко и др. // Proceedings of 4th International Symposium on Diamond Films and Related Materials. – Kharkov : NSC „KHIPHT”, 1999. –Р. 27–35.
4. Аксенов И. И. Синтез безводородных пленок алмазоподобного углерода / И. И. Аксенов, В. Е. Стрелецкий // Алмазные пленки и пленки родственных материалов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2001. – С. 97–105.

5. Эмиссионные свойства алмазных пленок / Ю. П. Топоров, Л. Л. Буйлов, А. Е. Алексенко и др. // Алмазные пленки и пленки родственных материалов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2002. – С. 157–161.
6. Калиниченко А. И. Образование $ta-C$ в термоупругих пиках ионов углерода и углеродов / А. И. Калиниченко, В. Е. Стрельницкий // Алмазные пленки и пленки родственных материалов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2003. – С. 147–152.
7. Пшеничнюк С. А. Влияние тонкого алмазоподобного покрытия на эмиссионные характеристики вольфрамовых острий / С. А. Пшеничнюк, Ю. М. Юмагузин // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, Вып. 2. – С. 72–76.
8. Гончаров В. К. Новые углеродные материалы на основе монокристаллов синтетического алмаза и алмазоподобных пленок для микроэлектроники / В. К. Гончаров, Г. А. Гусаков, М. В. Пузырев // Вестник БГУ. – 2006. – № 3. – С. 27–34.
9. Морозов С. В. Новые эффекты в графене с высокой подвижностью носителей / С. В. Морозов // УФН. – 2012. – Т. 182, № 4. – С. 437–442.
10. Вавилов В. С. Алмаз в твердотельной электронике / В. С. Вавилов // УФН. – 1997. – Т. 167, №1. – С. 17–22.
11. Корнилов М. Ю. Пять новелл о наноуглероде / М. Ю. Корнилов // Химия и жизнь. – 2005. №1. – С. 35–38.

Практична робота 4: «Методи отримання та застосування матеріалів, споріднених алмазоподібним»

Питання

1. Синтез безводневих плівок вуглецю.
2. Методи одержання гідрогенезованих аморфних C:H плівок
3. Магнетронні розпилювальні системи для отримання алмазоподібних матеріалів
4. Отримання, будова і властивості плівок AlN
5. Тонкоплівкові термопечатні матриці та беззначальні катоди

Задачі для розв'язання

Задача 1. Викласти фізико-хімічні основи методу іонно-стимульованого осадження нітридних плівок.

Задача 2. Електроннографічні дослідження ГЦП-фази W_2C показують, що найбільш інтенсивні лінії (002) і (110) мають міжплощинні відстані 0,235 і 0,177 нм. За цими даними оцінити величину параметрів a і c ГЦП - решітки.

Задача 3. Плівковий нітрид титану має ГЦК - решітку з параметром $a = 0,424$ нм, причому радіус іона Ti має величину $r^+ = 0,147$ нм. Виходячи із цих даних, оцінити величину радіуса (r^-) іона азоту.

Рекомендована література

1. Проценко І. Ю. Основи матеріалознавства наноелектроніки / І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. – Суми : СумДУ, 2004. – 108 с.
2. Синтез пленок карбидов W при быстром фотонном отжиге пленочных гетероструктур W/C / В. М. Иевлев, О. В. Сербин, С. Б. Куцев и др. // Алмазные пленки и пле-

- нки родственных материалов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2003. – С. 302–309.
3. Васильев М. А. Покрытия из TiN, осажденные методом вакуумного дугового разряда (обзор) / М. А. Васильев, В. Е. Панарин, А. А. Ткачук // Металлофиз. новейшие технол. – 2000. – Т. 22, № 11. – С. 58–71.
 4. Андриевский Р. А. Синтез и свойства пленок фаз внедрения / Р. А. Андриевский // Успехи химии. – 1997. – Т. 66. № 1. – С. 58–76.
 5. Белянин А. Ф. Выращивание магнетронным распылением пленок алмазоподобных материалов и применение слоистых структур на основе этих пленок в устройствах электронной техники / А. Ф. Белянин // Алмазные пленки и пленки родственных материалов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2003. – С. 67–73; 77–85; 89–92; 92–97; 97–100.
 6. Конденсация и рекомбинация углеродных радикалов и атомарного водорода при столкновении с поверхностью мягкой пленки a-C:H при комнатной температуре / А. Е. Городецкий, Р. Х. Залавутдинов, И. И. Архипов и др. // ВАНТ. – 2002. – Вып. 1–2. – С. 104–114.

Практична робота 5: «Методи отримання, кристалічна структура і властивості фулеренів»

Питання

1. Фулерени та їх конструктивні особливості.
2. Методи отримання фулеренів.
3. Кристалічна структура і властивості фулериту.
4. Застосування фулеренів в електроніці, медицині та комп'ютерній техніці

Задачі для розв'язання

Задача 1. Виходячи із величини діаметра C_{60} $D \approx 0,714$ нм, оцініть величину параметра ГЦК решітки фулериту. Отримані результати порівняти із результатом розрахунку на основі рентгенівських даних (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Розрахунок рентгенограми від фулериту C_{60}

| № п/п | d, нм | hkl | a, нм | № п/п | d, нм | hkl | a, нм |
|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-------|
| 1 | 0,820 | 111 | | 3 | 0,428 | 311 | |
| 2 | 0,502 | 220 | | 4 | 0,410 | 222 | |

$$a = a_{cp} \pm \Delta a_{cp}$$

Задача 2. Пояснити відмінність між фулеренами, фулеридами, фулеритами і ендофулеренами.

Задача 3. Знайти зміну густини фулериту C_{60} при переході при $T = 260$ К від ГЦК - ($a = 1,416$ нм) до ПК - решітки ($a = 1,410$ нм). Густина ГЦК - фази $\rho = 1,7 \cdot 10^3$ кг/м³.

Задача 4. Пояснити фізичну природу температур T_0 , T_g і $T_{ПК \rightarrow ГЦК}$ для фулериту C_{60} .

Задача 5. Виходячи із температурної залежності опору плівки Cu-C₆₀ ($d = 1$ мкм, $n_{Cu} : n_{C60} = 0,5$) (табл. 5.2), установити тип провідності і визначити енергію активації електропровідності.

Таблиця 5.2

Залежність опору від температури плівки Cu@C₆₀

| № п/п | R, Ом | T, К | № п/п | R, Ом | T, К | № п/п | R, Ом | T, К |
|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| 1 | 330 | 300 | 3 | 310 | 330 | 5 | 300 | 350 |
| 2 | 320 | 313 | 4 | 305 | 340 | 6 | 300 | 370 |

Питання для самостійного опрацювання

1. Методи отримання та виділення фулеренів.

Рекомендована література

1. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури / Д. М. Заячук. – Львів : Львівська політехніка, 2009. – 580 с.
2. Шпилевский Э. М. Металл-фуллереновые пленки: получение, свойства, применение / Э. М. Шпилевский // Алмазные пленки и пленки родственных материалов. – Харьков : ННЦХФТИ, 2003. – С. 242–263.
3. Раков Э. Г. Нанотрубки и фуллерены / Э. Г. Раков. – Москва : Мир, 2006. – 376 с.
4. Каманина Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов – перспективные материалы наноэлектроники свойства и области применения : учеб. пос. / Н. В. Каманина. – Санкт-Петербург : СПб ГУИТМО, 2008. – 137 с.
5. Сысун В. И. Фуллерены. синтез, методы получения. – Петрозаводск : НОЦ Плазма, 2002. – 23 с.

6.

Практична робота 6: «Застосування нанотрубок»

Питання

1. Одностінні та багатостінні нанотрубки.
2. Механізм росту вуглецевих нанотрубок (ВНТ).
3. Методи отримання ВНТ:
 - термічний;
 - лазерний;
 - піроліз вуглеводнів.
4. Застосування ВНТ в електроніці.
5. Виділення ВНТ із первинної суміші.
6. Фізичні властивості ВНТ.
7. Неорганічні нанотрубки.

Теоретичний матеріал

Визначити базис графітового шару можна по векторам a_1 і a_2 , вектор хіральності (C_h) можна представити сумою:

$$C_h = na_1 + ma_2,$$

де n і m – цілі числа, які називаються індексами хіральності.

Термін **хіральність** означає, що два предмети знаходяться у відповідності один до одного як ліва і права руки, тобто представляють собою дзеркальне зображення, які не співпадають при спробі їх суміщення в просторі. Наприклад, права рука не співпадає зі своїм дзеркальним відображенням, як і сторінка з надрукованим текстом, літери на якій завжди дивляться «в іншу сторону». Будь-яка геометрична фігура, яку не можна з'єднати з її відображенням, називається хіральною. Хіральними можуть бути молекули (природна винна кислота $\text{HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH}$) або кристалічна структура (двоокис кремнію – природний кварц, рис. 6.1) [1].

Хіральність нанотрубок позначається набором символів (n, m) , вказують координати шестикутника, який в результаті згортання площини повинен співпадати з шестикутником, що

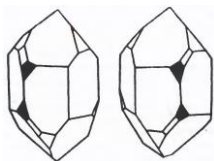


Рис. 6.1. Зображення правого і лівого кристалів кварцу [1]

знаходяться на початку координат. Інший спосіб позначення хіральності полягає у зазначенні кута θ між напрямом згортання ВНТ і напрямком, в якому сусідні шестикутники мають спільну сторону (рис. 6.2). Від значення кута хіральності залежать фізико-хімічні властивості ВНТ зокрема, її електричні характеристики. При зміні $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ електропровідність ОВНТ змінюється від напівпровідникової до металевої.

Однак у цьому випадку для повного опису геометрії нанотрубки необхідно вказати її діаметр. Індеси хіральності односторонової нанотрубки (n, m) визначають її діаметр D :

$$D = \frac{\sqrt{3}a_0}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2},$$

де $a_0 = 0,142$ нм - відстань між сусідніми атомами вуглецю в графітовій площині.

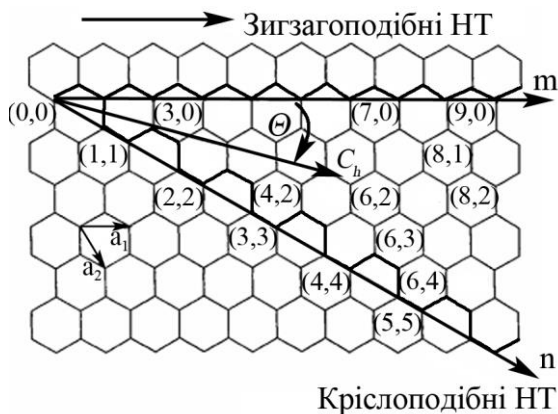


Рис. 6.2. Можливі індекси, вектори та кути хіральності ОВНТ

Зв'язок між індексами хіральності (n , m) і кутом Θ має наступний вигляд:

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

Область можливих значень кута хіральності відповідає 1/12 площини або сектору в 30° графітового згортку.

В залежності від кута хіральності розрізняють такі типи вуглецевих нанотрубок:

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

Довжину елементарної комірки уздовж осі нанотрубки (T) та кількість атомів вуглецю (N), що на неї припадає можна знайти за рівністю:

$$T = \frac{\sqrt{3}C_h}{d_H}, N = \frac{2(m^2 + nm + n^2)}{d_H} \quad \text{якщо } n - m \neq 3kd_H \text{ або}$$

$$T = \frac{\sqrt{3}C_h}{3d_H}, N = \frac{2(m^2 + nm + n^2)}{3d_H} \quad \text{якщо } n - m = 3kd_H,$$

де $C_h = \sqrt{3}a_0(m^2 + nm + n^2)^{1/2}$ - модуль вектора хіральності, d_H - найбільше спільне ділене n та m , k - ціле число.

Візьмемо одностінну нанотрубку зигзагоподібного типу (рис. 6.3). Закріпимо один кінець трубки, а до іншого її кінця прикладемо розтягувальну силу F .

Нехай в нанотрубці атоми вуглецю утворюють між собою однакові зв'язки (C-C, σ -зв'язку) і кути між ними рівні 120° .

Тоді при розтягуванні нанотрубки ці зв'язки будуть розтягуватися однаково. Однак розірватися нанотрубка може будь-яким чином, у залежності, наприклад, від того, який C-C зв'яз-

зок розірветься першим.

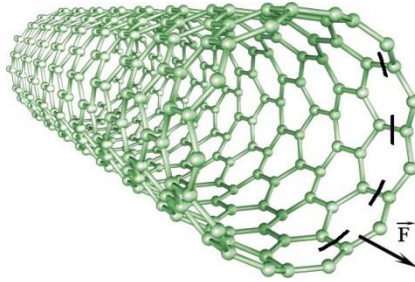


Рис. 6.3. Схематичне зображення ОВНТ з напрямком дії сили, що її розтягує F . Пунктирною лінією показані $C - C$ зв'язки, орієнтовані вздовж осі трубки

Щоб спростити розрахунки, припустимо, що внаслідок розтягування в ОВНТ розриваються тільки $C - C$ зв'язки, орієнтовані вздовж осі трубки і розташовані в одній площині її поперечного перерізу (лінії розриву позначені чорним пунктиром на рис. 6.3).

Із табличних даних відстань d між найближчими атомами вуглецю в ОВНТ приблизно дорівнює $d = 0,15$ нм. Якщо діаметр трубки дорівнює D , то кількість зв'язків N , орієнтованих уздовж осі трубки можна знайти із співвідношення:

$$N = \frac{\pi}{d} \cdot \frac{D}{\sqrt{3}}.$$

При цьому до кожного $C - C$ зв'язку прикладена сила, рівна F/N .

Знайти міцність $C - C$ зв'язку можна з графіка залежності потенційної енергії зв'язку (U) від відстані між атомами (рис. 6.4).

З графіка на рис. 6.4 потенційна енергія зв'язку досягає мінімального значення (348 кДж/моль), коли відстань між ядрами атомів становить 154 пм. Це і визначає відстань, на якій знаходяться атоми вуглецю в нерозтягнутій нанотрубці.

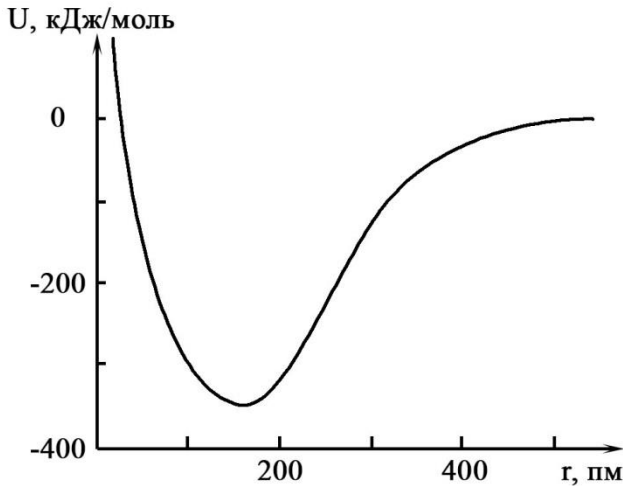


Рис. 6.4. Залежність потенційної енергії моля C-C зв'язків від відстані між ядрами

Тангенс нахилу дотичній правій гілці кривої на рис. 6.4 пропорційний силі F_l , необхідній для того, щоб утримувати атоми на даній відстані r :

$$F_l = \frac{\partial U}{\partial r} \cdot \frac{1}{N_A},$$

де N_A – число Авогадро.

Щоб збільшити відстань між атомами вуглецю треба прикласти силу F_l , і якщо ця сила буде більшою максимального тангенса кута нахилу (див. пунктирна лінія на рис. 6.4), то C-C зв'язок розірветься.

Нанотрубка розірветься, коли сила F , що розтягує трубку стане більшою за $3,8 \cdot N$ (нН), де N - число паралельних осей C-C зв'язків в одному поперечному перерізі трубки.

Міцність нанотрубки розраховується за співвідношенням:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S}.$$

Відстань між шарами в бездефектних БВНТ залежить від початкового діаметру нанотрубки ($D_{\text{тр}}$) і зменшується в міру його збільшення:

$$d_c = 0,344 + 0,1 \cdot e^{-\frac{D_{\text{тр}}}{2}},$$

де d_c – відстань між шарами в БВНТ.

Задачі для розв'язання

Задача 1. Визначити діаметр, кут хіральності та кількість атомів вуглецю, що припадає на одну елементарну комірку одношарової вуглецевої трубки типу (6,0); (5,5).

Задача 2. Яку необхідно прикласти силу (F_{\max}) до нанотрубки, щоб вона розірвалася, якщо її діаметр дорівнює $D = 1,5$ нм.

Задача 3. Розрахувати міцність F_{\max} нанотрубки, якщо її площа поперечного перерізу становить $4,15$ нм². Порівняйте отримані результати із показниками найміцнішої сталі $\sigma_{\max} = 0,8$ ГПа.

Задача 4. Знайти довжину елементарної комірки уздовж осі нанотрубки (6, 4) та її кут хіральності.

Задача 5. Визначити відстань між шарами в багат шарових ВНТ якщо $D_{\text{тр}}$ становлять: 0,7; 4,0; 5,0; 40 нм. Побудуйте графік залежності початкового діаметру БВНТ від відстані між шарами.

Рекомендована література

1. Нанотехнологии. Азбука для всех / под ред. Ю. Д. Третьякова. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
2. Раков Э. Г. Нанотрубки и фуллерены / Э. Г. Раков. – Москва : Мир, 2006. – 376 с.
3. Проценко І. Ю. Основи матеріалознавства наноелектроніки / І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. – Суми : СумДУ, 2004. – 108 с.
4. Запороцкова И. В. Углеродные и неуглеродные наноматериалы и композитные структуры на их основе: строение и электронные свойства / И. В. Запороцкова. – Волгоград : ВолГУ, 2009. – 490 с.
5. Ивановская В. В. Атомно-модифицированные нанотрубки / В. В. Ивановская, А. Л. Ивановский // Успехи химии. – 2011. – Т. 8. – С. 761–783.
6. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури / Д. М. Заячук. – Львів : Львівська політехніка, 2009. – 580 с.
7. Иглы на основе многостенных углеродных нанотрубок для сканирующей зондовой микроскопии / О. В. Демичева, Г. Б. Мешков, О. В. Сеницына и др. // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, № 11 – С. 118–123.
8. Браже Р. А. Теплопроводность углеродных супракристаллических нанотрубок / Р. А. Браже, В. С. Нефёдов // ФТТ. – 2012. – Т. 54, Вып. 7. – С. 1435–1438.
9. Электрические и газосенсорные свойства нанокомпозта на основе SnO₂ с многостенными углеродными нанотрубками / С. И. Рембеза, Ю. В. Шматова, Т. В. Свистова и др. // ФТП. – 2012. – Т. 46, Вып. 9. – С. 1213–1216.

10.

Практична робота 7: «Наномеханіка і нанобіоелектроніка»

Питання

1. Наномеханіка: наноелектромеханічні системи (НЕМС), мікроелектромеханічні системи (МЕМС),
2. Методи активації МЕМС.
3. Нанороботоприладобудування.
4. Нанобіоелектроніка.

Рекомендована література

1. Сысоева С. Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2010. - № 10. – С.15–22.
2. А. Борзенко Технология MEMS / А. Борзенко // Byte Россия. – 2006. - №1 (89).
3. Бородулин А. MEMS–технология на страже безопасности. Новые микросхемы датчиков STMicroelectronics / А. Бородулин // Вестник электроники. – 2010. – № 4 (28). – С. 18–21.
4. Нанотехнологии. Азбука для всех. – под ред. Ю.Д. Третьякова. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
5. Рухов А.В. Введение в нанотехнологию: метод. указания / А.В. Рухов, Е.Ю. Филатова. – Тамбов : ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 16 с.
6. Гірняк Ю. Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні / Ю. Гірняк // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. - № 69. – С. 97–102.
7. Головатий А. Розрахунок та конструювання пружних систем мікроелектромеханічних (МЕМС) гіроскопів // Вісник ТДТУ. – 2008. – Том 13. – №4. – С. 24–30.
8. Зелінський А. Я. Розроблення моделей для представлення мікроелектромеханічних систем / А. Я. Зелінський,

В. М. Теслюк // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. –
Вип. 21.13. – С. 362–367.