МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

**М.М. БУДНИК, В.М. КОРСУНСЬКИЙ,
В.В. ІЛЬЧЕНКО, І.Д. ВОЙТОВИЧ,
О.В. ПРОКОПЕНКО**

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТВЕРДОТІЛЬНИХ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Підручник

КИЇВ – 2024

УДК 621.382-022.532+537.8(075.8)
П75

Автори:
М.М. Будник, В.М. Корсунський, В.В. Ільченко,
І.Д. Войтович, О.В. Прокопенко

Рецензенти:
д-р фіз.-мат. наук, проф. В.І. Григорук
д-р фіз.-мат. наук, проф. Е.М. Руденко

Рекомендовано до друку Вченою радою
Навчально-наукового інституту високих технологій
(протокол № ____ від _____ 2024 року)

Ухвалено науково-методичною радою
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
(протокол № ____ від _____ 2024 року)

П75 Будник М.М., Корсунський В.М., Ільченко В.В., Войтович І.Д., Прокопенко О.В. Фізичні основи твердотільних нанотехнологій: підручник. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2024. – 379 с.
ISBN 978-XXX-XXX-XXX-X

Наведено основні відомості про фізичні основи та сучасний рівень науково-технічних досягнень в галузі твердотільних нанотехнологій на основі напівпровідників, феромагнетиків, надпровідників, графену, вуглецевих нанотрубок та описані інші напрямки створення наноелектронних елементів та перспективи розвитку цього напрямку.

Для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за програмами зі спеціальностей прикладна фізика та наноматеріали (E6), інформаційні системи та технології (F6), електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка (G5), та міждисциплінарними програмами, предметна область яких охоплює природничу (E), IT (F) та/чи інженерну (G) галузі.

УДК 621.382-022.532+537.8(075.8)

ISBN 978-XXX-XXX-XXX-X

© М.М. Будник, В.М. Корсунський, В.В. Ільченко та ін., 2024
© Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ВПЦ «Київський університет», 2024

ПЕРЕДМОВА

Якісні зміни властивостей елементів електронних схем при зменшенні їхніх розмірів до декількох нанометрів, численні нові ефекти, що спостерігаються в таких нанорозмірних елементах, створили ряд нових концепцій побудови електронної елементної бази, зокрема, такі нові напрями в сучасній електроніці, як наноелектромеханічні системи та спеціалізовані наносенсори, спінтроніка, молекулярна електроніка, одноелектроніка, магноніка та інші.

Нові підходи, ідеї, фізичні і схемотехнічні рішення з'явились у напрямках магнітної пам'яті, сенсорики, візуального відтворення інформації тощо. Використання цих концепцій уже дозволило істотно збільшити швидкодію електронних систем передачі, обробки та збереження інформації, зменшити розміри та енергоспоживання електронних пристроїв, покращити їхню надійність та розширити функціонал.

Подібно до того, як у кінці XX ст. на зміну мікроелектроніці прийшла наноелектроніка, через 10-20 років на зміну «традиційній» наноелектроніці може прийти спінтроніка, одноелектроніка, молекулярна електроніка, тощо. У спінтроніці (розд. 6) інформація кодується не величиною електричного заряду, певними рівнями електричної напруги чи струму, а напрямком спіну електронів. У молекулярній електроніці (розд. 7) перетворення інформації відбувається на рівні окремих молекул або їхніх невеликих ансамблів. Багато галузей наноелектроніки тільки починають розвиватися.

Розвиток інноваційних технологій, розробка і створення нових типів електронних пристроїв збереження, обробки та передачі інформації неможливі без розуміння фізичних принципів роботи та технічних особливостей новітніх елементів електронних систем. Допоможуть оволодіти цими знаннями

відповідні монографії, навчальні посібники, журнальні статті, як вітчизняні, так і зарубіжні, де розглянуто ці питання (див. перелік рекомендованої літератури). Однак у більшості цих робіт основну увагу приділено лише деяким галузям сучасної електроніки, а інші, не менш цікаві та перспективні галузі електроніки, часто не розглядаються на належному рівні.

З іншого боку, у книгах і статтях часто розглядають специфічні питання, цікаві лише для обмеженого кола фахівців, а сам розгляд проводиться з використанням складних фізичних моделей та експериментальних методик, математичного апарату, тобто для достатньо підготовленого читача. Зважаючи на це, літературних джерел, де б достатньо широко і водночас стисло і зрозуміло було б викладено фізичні основи сучасної наноелектроніки, окреслені основні перспективні напрями її розвитку, виявляється досить небагато.

При написанні підручника допоміг попередній досвід використання в навчальному процесі посібників «Фізико-технологічні основи наноелектроніки» (Будник М. М., Войтович І. Д., Ільченко В. В., Корсунський В. М. [65]) та «Сучасна радіофізика та електроніка» [66], а також відповідного до змісту посібників збірника задач [67].

За результатами апробації в навчальному процесі протягом 2015-2024 років до тексту підручника внесено ряд змін, збільшено обсяг навчального матеріалу, зокрема, додано задачі.

Матеріал підручника організовано таким чином. У вступних розд. 1–3 розглянуто специфіку фізичних явищ при переході в нанометровий масштаб, базові відомості з методів дослідження та технології виготовлення наноелектронних структур.

Розділи 4–6 містять спеціалізований навчальний матеріал, присвячений різним розділам сучасної наноелектроніки (сенсорика, магнітні диски, спінтроніка). Формально вони незалежні, проте рекомендується вивчати навчальний матеріал послідовно, оскільки в тексті проводяться порівняння матеріалу поточних розділів з матеріалом попередніх.

Розділи 7–9 містить навчальний матеріал, присвячений різним розділам молекулярної та вуглецевої (фулерени, графен) електроніки. Формально вони незалежні, проте рекомендується вивчати навчальний матеріал послідовно, оскільки в підручнику проводяться посилання на матеріал попередніх розділів.

У кінці кожного розділу наведено висновки щодо матеріалу і запитання для самоконтролю, корисні для самостійної роботи студентів, а також вправи, які дозволяють практично перевірити рівень здобутих знань. Наприкінці наведено рекомендації щодо розв'язання найбільш складних вправ.

Також автори намагалися не перевантажувати текст формулами, а орієнтувалися на якісне розуміння студентом предметної галузі, тому навчальний матеріал викладено з використанням спрощених фізичних моделей та було вилучено деякі специфічні та складні теми.

Підручник призначений для забезпечення навчальної дисципліни «Твердотільна мікро- та нанотехнологія» для магістрів 2-го р. н. в рамках міждисциплінарної освітньо-наукової програми «Фізика інформаційних технологій», яка охоплює спеціальності «прикладна фізика та наноматеріали» (E6) та «інформаційні системи та технології» (F6) на кафедрі нанофізики та наноелектроніки ННІ високих технологій. Також він може бути використаний для спеціальності «електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» (G5), а також в інших міждисциплінарних чи міжгалузевих освітніх програмах, які охоплюють природничу (E), IT (F) та інженерну (G) галузі.

З М І С Т

ПЕРЕДМОВА…….,,,,……		3
Перелік скорочень, позначень та символів……..		6
Вступ – що таке наноелектронна елементна база?.....		7
Розділ. 1. ЯКІСНІ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ ПЕРЕХОДІ ДО НАНОРОЗМІРІВ…..……		10
Вступ……...		10
1.1.	Взаємодія наночастинок зі світлом…….....	11
1.2.	«Класичні» розмірні ефекти…..…….	13
1.3.	Зміна енергетичного спектру носіїв електричного заряду…….	15
1.3.1.	Квантова площина…..……...	16
1.3.2.	Квантова лінія……...	20
1.3.3.	Квантові точки……..	22
1.4.	Одноелектронне тунелювання..……...	24
1.4.1.	Кулонівська блокада…….....	24
1.4.2.	Одноелектронні коливання..……...	26
1.4.3.	Кулонівські сходинки……..	27
1.5.	Резонансне тунелювання..……	29
1.6.	Квантовий ефект Холла……...	32
1.7.	Явища квантової інтерференції……...	35
Висновки……..		38
Запитання для самоконтролю..……..		42
Задачі до розділу 1……..		43
2.	**Від мікроелектронної технології до наноелектронної……**	46
2.1.	Технології формування шарів нанометрової товщини	46
2.1.1.	Вакуумне напилювання……...	46
2.1.2.	Хімічні («газофазні») методи формування плівок……	47
2.1.3.	Технологія молекулярно-променевої епітаксії…..……	49
2.1.4.	Метод «гарячої стінки»……..……...	52
2.1.5.	Технологія Ленгмюра-Блоджет..……	54
2.2.	Від фотолітографії до нанолітографії..…….....	59
2.2.1.	Фотолітографія ……	59
2.2.2.	Електронна літографія……	61

2.2.3.	Нанодрук……	63
2.3.	Зондові методи наноструктурування..……	67
2.3.1.	Горизонтальне пересування….……	68
2.3.2.	«Вертикальне» переміщення……..	70
2.3.3.	Електронне експонування за допомогою зонда..……..	71
2.3.4.	Локальні розігрів, окислення, гравірування та хімічне осадження за допомогою зонда……...……...	71
2.4.	Технології, що використовують самоорганізацію молекул……..	73
2.4.1.	Самоорганізація молекул на поверхні твердого тіла....	74
2.4.2.	Самоформування при епітаксії……	77
2.4.3.	Перспективи вдосконалення технологій самоорганізації……	79
Висновки..……		82
Запитання для самоконтролю..……..		86
Задачі до розділу 2…...……		87
3.	**Методи досліджень нанорозмірних елементів…….**	91
Вступ……		91
3.1.	Растрові електронні мікроскопи.……	91
3.2.	Скануючий тунельний мікроскоп……...	97
3.3.	Скануючий атомно-силовий мікроскоп…….……....	101
3.4.	Подальший розвиток скануючої зондової мікроскопії	108
3.5.	Скануючий оптичний мікроскоп ближнього поля.…..	113
3.6.	Нанометрологія……	119
Висновки……..		120
Запитання для самоконтролю……		123
Задачі до розділу 3……..		124
4.	**Наноелектронні спеціалізовані елементи та сенсори…….**	127
Вступ……		127
4.1.	АЦП конвеєрного типу……	127
4.2.	Хімічно чутливі польові транзистори та сенсори на їх основі……..……...	129
4.3.	Наноелектромеханічні конструкції на кремнії...……..	132
4.4.	Наноелектромеханічні сенсори….…….....	136
4.4.1.	Біохімічні сенсори на нанокантілеверах…...……	136

4.4.2.	Мікромеханічні кремнієві акселерометри…….	138
4.4.3.	Мікромеханічні кремнієві гіроскопи-акселерометри…	140
4.4.4.	Мікросистемні сенсори тиску…….	143
4.4.5.	Автоматизовані мікрофлюїдні кремнієві чипи……..	148
4.5.	Наноелектромеханічний транзистор…….....	152
Висновки……..		154
Запитання для самоконтролю……		158
Задачі до розділу 4…...…….……..		159
5.	**Магніторезистивні ефекти та розвиток накопичу-вачів на магнітних дисках……**	163
5.1.	Довідка із загального курсу фізики…….	163
5.2.	Накопичувачі інформації на феромагнітних дисках….	167
5.3.	Проблеми, що виникли при переході у нанометровий діапазон……..	171
5.4.	Гігантський, тунельний та колосальний МР ефект…..	172
5.4.1.	Гігантський магніторезистивний ефект…….	172
5.4.2.	Тунельний магніторезистивний ефект……..	176
5.4.3.	Колосальний магніторезистивний ефект..……..	179
5.5.	Магніторезистивні зчитувальні голівки…….	182
Висновки……..		186
Запитання для самоконтролю……		186
Задачі до розділу 5…….……...		189
6.	**Основи спінтроніки……**	194
Вступ……		194
6.1.	Феромагнітна елементна база спінтроніки…….....	195
6.1.1.	Спіновий клапан……...	195
6.1.2.	Спін-вентильний транзистор……...	197
6.1.3.	Тунельний спін-вентильний транзистор……	200
6.1.4.	Спін-транзистор з напівпровідниковою базою…..……	202
6.1.5.	Спіновий польовий транзистор……...	203
6.1.6.	Спінтронне реле……	204
6.2.	Спін-поляризований електричний струм та спін-струм……..	207
6.2.1.	Спін-поляризований електричний струм……...	207
6.2.2.	Спін-струм……	208
6.2.3.	Співвідношення між спін-струмом та спін-поляризо-	

	ваним електричним струмом…….....	209
6.3.	Спін-транспортне перемагнічування……..	210
6.4.	„Чистий” спін-струм. Спін-рушійна сила…..…….	212
6.5.	Проходження спін-поляризованого струму крізь контакт феромагнетика з немагнітним провідником…	216
6.6.	Проходження спін-поляризованого струму через контакт феромагнетика з напівпровідником …….....	218
6.7.	Феромагнітні напівпровідники……	221
6.8.	Спінтронні світлодіоди…….....	224
6.9.	Спінтронні акумулятори……..	225
Висновки……..		226
Запитання для самоконтролю……		229
Задачі до розділу 6……...…….....		230
7.	**Фізичні основи молекулярної електроніки……..**	234
Вступ……		234
7.1.	Квантово-механічний погляд на будову молекул…….	234
7.1.1.	Атомні орбіталі…….....	235
7.1.2.	Молекулярні орбіталі……..……	239
7.1.3.	Молекулярні орбіталі при кратних хімічних зв’язках..	242
7.1.4.	Гібридизація атомних орбіталей……..……...	244
7.2.	Властивості молекул…….....	247
7.3.	Енергетичні рівні та оптична поведінка молекул…….	251
7.4.	Взаємодія молекул……	255
7.5.	Супрамолекулярні структури……..	258
7.6.	Молекулярне розпізнавання…….....	262
7.6.1.	Люмінесцентні молекулярні сенсори……	262
7.6.2.	Молекулярне розпізнавання на наночастинках металу……..…….....	264
7.6.3.	Колориметричні наносенсори……..……...	270
Висновки……..		273
Запитання для самоконтролю……		275
Задачі до розділу 7..…….....		276
8.	**Фулерени, вуглецеві нанотрубки та інші кластери**	280
8.1.	Карбон – унікальний хімічний елемент……..	280
8.2.	Вуглецеві кластери……..…….	284
8.3.	Фулерени……..…….	287

8.4.	Вуглецеві нанотрубки…….....	290
8.5.	Механічні та «контейнерні» властивості ВНТ……..	293
8.6.	Коротко про технології виготовлення ВНТ……..	296
8.7.	Провідники, міжз'єднання інтегральних схем і резистори на основі ВНТ та фулеренів…….....	299
8.8.	ВНТ як катоди для холодної емісії електронів……..	300
Висновки…….……		303
Запитання для самоконтролю…….……...		306
Задачі до розділу 8……..…….....		307
9	**Наноелектронні елементи на основі графену……...**	310
9.1.	Графен та його фізичні властивості……	310
9.1.1	Структура графену……...……	310
9.1.2	Фізичні властивості графену……...	311
9.1.3	Енергетичний спектр електронів у графені……...	312
9.1.4	Особливості реальних плівок графену……...	315
9.1.5	Зміни при хімічній модифікації графену……	316
9.2.	Польові транзистори на основі суцільних плівок графену……..…….....	318
9.3.	Польові транзистори на основі вузьких смужок графену…….	321
9.4.	Сенсори на основі графену……..	324
9.5.	Короткий огляд методів виготовлення графену……	330
Висновки…….……		334
Запитання для самоконтролю…….……...		336
Задачі до розділу 9…….……..		337
Предметний покажчик…….……...		341
Фізичні константи та характеристики матеріалів……		346
Рекомендації до розв'язування задач…….…...		348
Відповіді до задач……..……		356
Список рекомендованої літератури ……		370