МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

Підручник

КИЇВський ВПЦ УНІВЕРСИТЕТ
2020

УДК 621.382-022.532+537.8(075.8)
П75

Автори:

М. М. Будник, І. Д. Войтович, А. В. Коваленко,
В. М. Корсунський, В. Н. Курашов, О. В. Прокопенко

Рецензенти:

д-р фіз.-мат. наук, проф. В. В. Ільченко,
канд. фіз.-мат. наук, проф. П. В. Мельник

Рекомендовано до друку вченою радою
факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
(протокол № 1 від 17 вересня 2018 року)

Ухвалено науково-методичною радою
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
(протокол № 3-20 від 26 червня 2020 року)

П75 Прикладна фізика та електроніка : підручник / М. М. Будник, І. Д. Войтович, А. В. Коваленко та ін. – К. : ВПЦ "Київський університет", 2020. – 431 с.

ISBN 978-966-433-953-8

Розглянуто науково-технічні засади розвитку нового напряму електроніки – наноелектроніки, фізичні основи та принципи побудови цифрових елементів і пристроїв, а також основні її напрями: одноелектроніка, нанорозмірні кремнієві КМДН-транзистори, гетеротранзистори, магніторезистивна пам'ять, спінтроніка, надшвидка одноквантова логіка, молекулярна електроніка, вуглецеві нанотрубки та фулерени.

Для студентів закладів вищої освіти технічних і фізичних спеціальностей у галузях електроніки, фізики, мікро- і наноелектроніки та нанотехнологій.

УДК 621.382-022.532+537.8(075.8)

ISBN 978-966-433-953-8

© Будник М. М., Войтович І. Д.,
Коваленко А. В. та ін., 2020
© Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ВПЦ "Київський університет", 2020

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:

– *молекулярна електроніка*;

– *наноелектромеханічні системи*;

– *одноелектроніка*;

– *спінтроніка, магноніка, спін-орбітроніка*;

– *надшвидка одноквантова логіка* тощо.

У молекулярній електроніці (див. розд. 13) перетворення інформації відбувається на рівні окремих молекул або їхніх невеликих ансамблів. У спінтроніці (див. розд. 11) інформація кодується не величиною електричного заряду, певними рівнями електричної напруги чи струму (як у звичайній електроніці), а напрямком проекції спіну елементарних частинок. Використання нанорозмірних переходів Джозефсона дозволяє створювати надшвидку одноквантову логіку, яка працює з використанням явища надпровідності (див. розд. 12).

Активно розробляються одноелектронні пристрої, які здатні успішно працювати за умови протікання крізь них надзвичайно малих струмів, пов'язаних із рухом окремих електронів (див. розд. 5). Нові підходи, ідеї, фізичні і схемотехнічні рішення з'явились також у галузях 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, розширити їхні функціональні властивості тощо. Однак технічні та технологічні можливості відповідних напрямів електроніки ще далеко не вичерпані! Насправді розвиток багатьох галузей сучасної електроніки тільки починається, що згодом може привести до нової технологічної революції. Подібно до того, як у кінці XX ст. на зміну мікроелектроніці прийшла наноелектроніка, на зміну "традиційній" наноелектроніці через 10–20 років може прийти молекулярна електроніка, спінтроніка, одноелектроніка тощо.

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 в кінці книги). Однак у більшості цих робіт основну увагу приділено лише деяким галузям сучасної електроніки, а інші, не менш цікаві та перспективні галузі електроніки, часто-густо не розглядаються на належному рівні.

З іншого боку, у таких книгах і статтях досить часто розглядаються специфічні питання, цікаві лише для обмеженого кола фахівців, а сам розгляд проводиться з використанням складних фізичних моделей та експериментальних методик, складного математичного апарату, тобто в розрахунку на достатньо підготовленого читача. Зважаючи на це, літературних джерел, де б достатньо широко і водночас стисло і зрозуміло було б викладено фізичні основи сучасної електроніки, окреслені основні перспективні напрями її розвитку, виявляється досить небагато. Автори сподіваються, що цей підручник дозволить хоча б частково усунути брак відповідної вітчизняної навчальної літератури.

При написанні підручника допоміг практичний досвід використання в навчальному процесі посібника "Сучасна радіофізика та електроніка", який був виданий авторами у 2015 р. [1]. За

результатами цієї апробації до тексту навчального посібника було внесено ряд змін, збільшено обсяг навчального матеріалу, представленого у книзі, зокрема, додано вступні розд. 1–4, дещо змінилась структура інших розділів книги, що й привело до створення цього підручника.

Матеріал підручника організовано таким чином. У вступних розд. 1–4 розглянуто основні фізичні явища і моделі, які використовуються у подальших розділах. Читач, добре обізнаний з основами квантової механіки, атомної фізики, статистичної фізики та фізики твердого тіла, при бажанні може пропустити вступні розділи і звертатись до них лише за необхідності. Автори сподіваються, що завдяки такій організації підручника вивчення представленого в ньому навчального матеріалу може відбуватись з мінімальним залученням додаткової літератури, що важливо, зважаючи на специфіку реального навчального процесу.

Розд. 5–14 містять спеціалізований навчальний матеріал, присвячений фізико-технічним основам сучасної електроніки. І хоча формально вони незалежні, проте рекомендується вивчати навчальний матеріал послідовно, починаючи з розд. 5, оскільки в книзі досить часто проводяться порівняння навчального матеріалу поточного розділу з матеріалом попередніх розділів.

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

При написанні підручника автори орієнтувались на читача із середнім рівнем знань, що приблизно відповідає освітньому рівню "бакалавр". За рахунок цього з навчального матеріалу книги було вилучено деякі специфічні та складні теми, у декількох місцях навчальний матеріал було викладено більш детально або з використанням спрощених фізичних моделей.

За необхідності глибшого розуміння специфіки фізичних процесів у нанорозмірних системах, особливостей технології їхнього виготовлення та методик дослідження рекомендуємо читачу звернутися до навчального посібника "Фізико-технологічні основи наноелектроніки" (Будник М. М., Войтович І. Д., Ільченко В. В., Корсунський В. М., [2]) або скористатись рекомендованою літературою, перелік якої наведено в кінці книги.

Автори щиро вдячні співробітниці кафедри нанофізики та наноелектроніки Київського національного університету імені Т. Шевченка Л.Є. Прокопенко за допомогу в оформленні книги. Автори також вважають своїм приємним обов'язком висловити подяку рецензентам підручника – професорам В. В. Ільченку та П. В. Мельнику – за уважне та об'єктивне рецензування. Нарешті, автори були б раді почути критичні зауваження та побажання читачів, врахування яких, без сумніву, дозволить створити нову покращену версію підручника.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 3

Перелік скорочень, позначень та символів 7

Розділ 1. КВАНТОВІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІЇ 9
1.1. Хвильові властивості частинок 10
1.2. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга 15
1.3. Хвильова функція та рівняння Шредінгера 18
1.4. Потенціальні ями та бар'єри. Тунельний ефект 21
1.5. Одноелектронне тунелювання 29
1.5.1. Кулонівська блокада 29
1.5.2. Одноелектронні коливання 31
1.5.3. Кулонівські сходинки 32
1.6. Резонансне тунелювання 34
Висновки 38
Запитання для самоконтролю 39
Вправи 40

Розділ 2. ЕЛЕМЕНТИ ЗОННОЇ ТЕОРІЇ ТВЕРДИХ ТІЛ 44
2.1. Атомні орбіталі 44
2.2. Як утворюються енергетичні зони? 47
2.3. Енергетичні зони металів 50
2.4. Чому метали проводять електричний струм? 51
2.5. Напівпровідники та діелектрики 51
2.6. Що зображено на зонній діаграмі? 53
2.7. Власна та домішкова провідність напівпровідників 56
Висновки 63
Запитання для самоконтролю 64
Вправи 65

Розділ 3. СИСТЕМИ БАГАТЬОХ ЧАСТИНОК 67
3.1. Спін 67
3.2. Принцип тотожності частинок 69
3.3. Статистика Фермі–Дірака 72
3.4. Статистика Бозе–Ейнштейна 74
Висновки 77
Запитання для самоконтролю 77
Вправи 78

Розділ 4. НАДПРОВІДНИЙ СТАН РЕЧОВИНИ 80
4.1. Основи фізики надпровідності 80
4.2. Ефекти Джозефсона 83
4.3. Динамічні процеси в джозефсонівських переходах 86
4.4. Вплив магнітного поля на джозефсонівський контакт 92
4.5. Квантова макроскопічна інтерференція
в надпровідних системах 94
4.6. Типи джозефсонівських контактів
та їхні характеристики 95
Висновки 98
Запитання для самоконтролю 100
Вправи 101

Розділ 5. ОДНОЕЛЕКТРОНІКА – ОДНА З НОВИХ КОНЦЕПЦІЙ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ 104
5.1. Одноелектронний транзистор 104
5.2. Одноелектронні логічні схеми 110
5.3. Одноелектронні клітинні автомати 114
5.4. Одноелектронні елементи та матриці пам'яті 119
Висновки 121
Запитання для самоконтролю 122
Вправи 123

Розділ 6. НАНОЕЛЕКТРОННА ЛОГІКА НА КРЕМНІЄВИХ КМДН-ТРАНЗИСТОРАХ 127
6.1. КМДН-транзистори 127
6.1.1. Структура і характеристики
n-канального МДН-транзистора 128
6.1.2. Структура та характеристики
p-канального МДН-транзистора 130
6.1.3. Комплементарні МДН-транзистори 132
6.2. КМДН-логіка 133
6.2.1. Базовий елемент КМДН-логіки – інвертор 133
6.2.2.КМДН-логічні елементи – NOR та NAND 134
6.2.3.Переваги КМДН-логіки 136
6.3. Масштабування та перехід у нанорозмірну область 137
6.3.1. Проектно-технологічна норма 137
6.3.2. Принцип масштабування та його якісні зміни
на "наноелектронному етапі" 138
6.4. Основні проблеми електроніки на КМДН-транзисторах 139
6.4.1. Проблема міжз'єднань 139
6.4.2. Проблема тепловідведення 141
6.4.3. Інші проблеми 142

6.5. Перехід до технологій "кремній на ізоляторі" 143
6.5.1. Варіант "кремній на сапфірі" 143
6.5.2. Варіант "кремній на захороненому оксиді" 144
6.5.3. Варіанти з об'ємними затворами 145
6.6. Нове покоління фоточутливих КМДН-матриць 146
6.6.1. Схеми фоточутливої комірки 147
6.6.2. Організація фоточутливої матриці 149
6.6.3. Організація кольорових фоточутливих матриць 151
6.6.4. Переваги наноелектронних фоточутливих КМДН-матриць 152
Висновки 153
Запитання для самоконтролю 157
Вправи 158

Розділ 7. НАНОЕЛЕКТРОННА ПАМ'ЯТЬ НА КРЕМНІЄВИХ КМДН-ТРАНЗИСТОРАХ 162
7.1. "Статична" оперативна пам'ять з довільним доступом 162
7.2. "Динамічна" оперативна пам'ять з довільним доступом 166
7.3. Пам'ять на МДН-транзисторах із плаваючим затвором 172
7.3.1. Принцип роботи комірки флеш-пам'яті 172
7.3.2. Одно- та багатобітовий режими роботи 174
7.3.3. Принцип запису та стирання інформації з комірки флеш-пам'яті 175
7.3.4. Організація та робота NOR-флеш-пам'яті 176
7.3.5. Організація та робота NAND-флеш-пам'яті 179
7.3.6. Порівняння NOR- і NAND-флеш-пам'яті та їхнє застосування 181
7.3.7. Флеш-пам'ять на МДН-транзисторах із зарядовими пастками 183
7.4. Пам'ять на МДН-транзисторах з елементами зі зміною фазового стану 185
7.5. Наноелектронні ПЛІС на КМДН-транзисторах 188
Висновки 190
Запитання для самоконтролю 194
Вправи 195

Розділ 8. НАНОЕЛЕКТРОННІ ЕЛЕМЕНТИ НА НАПІВПРОВІДНИКАХ ГРУПИ $A_{III}B_{V}$ І ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРИ 198
8.1. Польові транзистори із затвором Шотткі 199
8.2. Польові гетеротранзистори із затвором Шотткі 204

8.3. Біполярні гетеротранзистори 208
8.4. Гетеротранзистори з резонансним тунелюванням 211
8.5. Гетеротранзистори на "гарячих" електронах 215
Висновки 217
Запитання для самоконтролю 220
Вправи 221

Розділ 9. ЗАСТОСУВАННЯ ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРІВ, ПРИСТРОЇ НА ПОВЕРХНЕВІЙ АКУСТИЧНІЙ ХВИЛІ, СВІТЛОДІОДИ, ЛАЗЕРНІ ДІОДИ 226
9.1. Області застосування гетеротранзисторів 226
9.2. Функціональні пристрої на поверхневих акустичних хвилях 230
9.3. Напівпровідникові світлодіоди на "наноелектронному" етапі розвитку 235
9.4. Лазерні діоди 240
Висновки 243
Запитання для самоконтролю 245
Вправи 246

Розділ 10. НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАПИСУ НА МАГНІТНІ ДИСКИ. МАГНІТОРЕЗИСТИВНА ПАМ'ЯТЬ 252
10.1. Подальше вдосконалення технології запису/зчитування інформації на магнітних дисках 252
10.1.1. Технологія "перпендикулярного запису" інформації 252
10.1.2. Технологія з локальним нагріванням ділянки запису 254
10.1.3. Перехід на окремі домени 256
10.1.4. Використання поверхневих плазмонів 259
10.2. Магніторезистивна оперативна пам'ять із довільним доступом 262
10.2.1. Елементарна комірка новітньої магнітної пам'яті 262
10.2.2. Матрична організація МРОЗП 263
10.2.3. Оптимізована структура комірки МРОЗП 269
10.2.4. Функціонування МРОЗП 272
10.2.5. Подальше удосконалення МРОЗП 273
Висновки 276
Запитання для самоконтролю 278
Вправи 279

Розділ 11. ПАМ'ЯТЬ З ВИКОРИСТАННЯМ СПІН-ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ ТА СПІНТРОННІ ЛОГІЧНІ СХЕМИ 284
11.1. Пам'ять з використанням спін-транспортного перемагнічування..... 284
11.1.1. Друге покоління магніторезистивної пам'яті..... 284
11.1.2. Трекова пам'ять 287
11.2. Спінтронні пристрої обробки інформації першого покоління..... 292
11.2.1. Логіка на спінових вентилях 292
11.2.2. Логіка на наномагнітах 298
11.3. Спінтронні пристрої обробки інформації другого покоління .. 302
11.3.1. Логіка на наномагнітах другого покоління..... 302
11.3.2. Логіка з використанням латерального СТП..... 303
11.3.3. Логіка з використанням однодоменного СТП 305
11.3.4. Комбінування спінтронної логіки з КМДН-схемами..... 307
11.3.5. Логіка з використанням нелокального СТП 307
11.4. Магніторезистивна порогова логіка – наноелектронна елементна база для нейрокомп'ютерів..... 311
Висновки..... 315
Запитання для самоконтролю..... 318
Вправи 319

Розділ 12. НАДШВИДКА ОДНОКВАНТОВА ЛОГІКА..... 324
12.1. Динамічні властивості переходу Джозефсона..... 324
12.2. НОК-тригер..... 326
12.3. Основні схеми НОК-логіки 328
12.3.1. Принципи організації обробки інформації в НОК-схемах 328
12.3.2. *D*-елемент..... 329
12.3.3. НОК-інвертор 330
12.3.4. НОК-схеми диз'юнкції та кон'юнкції..... 331
12.3.5. Генератор і формувач тактових НОК-імпульсів..... 333
12.4. Переваги наноелектронної елементної бази НОК-логіки..... 335
Висновки..... 336
Запитання для самоконтролю..... 338
Вправи 339

Розділ 13. МОЛЕКУЛИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ ПАМ'ЯТІ, ЛОГІКИ ТА ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ..... 342
13.1. Пам'ять із використанням дипольного моменту молекул 342

13.2. Пам'ять із використанням змін конфігурації молекул 344
13.3. Пам'ять із використанням ротаксанів 346
13.4. Потенціальна логіка на молекулах 349
13.5. Електропровідність молекул і контактів металу з молекулою 353
13.6. Молекулярний транзистор 357
13.7. Молекули як елементи для мережі клітинних автоматів 359
13.8. Молекули як основа пристроїв візуального відображення інформації 361
13.9. Становлення "молекулярної технології" 366
Висновки 367
Запитання для самоконтролю 370
Вправи 371

Розділ 14. ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК І ФУЛЕРЕНІВ У ЕЛЕКТРОНІЦІ 374
14.1. Транзистори та логічні схеми на основі ВНТ 374
14.1.1. Польові транзистори на основі ВНТ 374
14.1.2. Аналоги КМДН-транзисторів на основі ВНТ 379
14.1.3. ВНТ з Y-розгалуженням 381
14.1.4. Залежність електропровідності ВНТ від магнітного поля 382
14.2. Наноелектромеханічні реле на основі ВНТ 384
14.3. Пристрої пам'яті на основі ВНТ 385
14.3.1. ВНТ-флеш-пам'ять із плаваючим затвором 385
14.3.2. ВНТ-флеш-пам'ять із зарядовими пастками 387
14.3.3. ВНТ-пам'ять на елементах зі зміною фазового стану 389
14.3.4. Електромеханічна пам'ять на ВНТ 390
14.3.5. Пам'ять на металофулерені, капсульованому всередині ВНТ 393
14.4. Сенсори на основі ВНТ 396
14.5. Пристрої відображення інформації на основі ВНТ 403
Висновки 406
Запитання для самоконтролю 409
Вправи 410

Вказівки до розв'язання вправ 414

Список рекомендованої літератури 419

Предметний покажчик 423

Навчальне видання

БУДНИК Микола Миколайович
ВОЙТОВИЧ Ігор Данилович
КОВАЛЕНКО Андрій Віленович
КОРСУНСЬКИЙ Володимир Мойсейович
КУРАШОВ Віталій Наумович
ПРОКОПЕНКО Олександр Володимирович

ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

Підручник

Редактор *Л. П. Львова*

Оригінал-макет виготовлено ВПЦ "Київський університет"

Виконавець *Т. Мельничук*

Формат 60x84$^{1/16}$. Ум. друк. арк. 25,11. Наклад 100. Зам. № 219-9378.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Рф4*.
Підписано до друку 21.07.20

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28
e-mail:vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
http: vpc.univ.kiev.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02