МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

М.М. БУДНИК
В.Ю. МАЛИШЕВ
О.В. ПРОКОПЕНКО

П Р И К Л А Д Н А
Н А Д П Р О В І Д Н І С Т Ь

Підручник

КИЇВ – 2024

УДК 621.382-022.532+537.8(075.8)
П75

Автори:
М.М. Будник, В.Ю. Малишев, 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., Малишев В.Ю., Прокопенко О.В. Прикладна надпровідність: підручник. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2024. – 309 с.
ISBN 978-XXX-XXX-XXX-X

Розглянуто науково-технічні засади застосування явища надпровідності, зокрема фізичні основи, принципи побудови елементів і пристроїв, основні види – низькотемпературна та високотемпературна, напрями розвитку електроніки – слабка, цифрова, силова, квантові обчислення, а також конструктивні, технологічні, експлуатаційні аспекти та ін.

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.Ю. Малишев, О.В. Прокопенко, 2024
© Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ВПЦ «Київський університет», 2024

ПЕРЕДМОВА

Відомо, що кімнатна температура не є оптимальним середовищем для роботи електронних приладів. Вона є зручною для користувача, а електронним виробам завдає клопоту у зв'язку з тепловиділенням, шумами і прискоренням зношення. Зниження робочої температури не лише зменшує ці проблеми, а й взагалі поліпшує роботу електронних приладів, схем і систем на напівпровідникових, оптичних і магнітних матеріалах [1].

Не так давно виникло поняття кріогенної електроніки, яка працює при кріогенних температурах, верхньою границею яких пропонують вважати 100К (-173°С) [2].

Кріогенна електроніка має ряд переваг перед звичайною: підвищення швидкодії цифрових пристроїв, краще відношення сигнал/шум і більш широкий діапазон аналогових пристроїв, підвищена чутливість сенсорів, більш висока точність і діапазон вимірювальних приладів. Покращення може бути від двох разів до багатьох порядків. У деяких випадках кріогенна електроніка забезпечує наближення до меж, встановлених самою природою. Середовище, яке створюється кріогеними температурами, також на багато порядків уповільнює процеси старіння.

Надпровідникові системи працюють за наднизьких температур, при яких проявляється явище надпровідності. Раніше це був гелієвий діапазон - нижче 10К, що в першу чергу стримувало широке впровадження надпровідності. Але у зв`язку з відкриттям високотемпературної надпровідності вагомість цього недоліку у майбутньому буде зменшуватись.

Має місце значне перекриття цих двох гілок електроніки по виконуваним ними функціям, але кожна з них усе-таки має свої переваги. Тому можливо у майбутньому будуть створені напів- чи надпровідникові гібриди, які матимуть найкращі риси кожної із гілок. Особливо це може стати актуальним у зв'язку з відкриттям високотемпературних надпровідників і переходом в азотний температурний діапазон від 50 до 100К.

Даний підручник присвячено прикладним застосуванням надпровіднності, де за останні десятиріччя намітився значний прогрес. У цей період бурхливо розвивались дослідження не тільки в новій галузі високотемпературних надпровідників, але

почали інтенсивно впроваджуватись в електроніку низькотемпературні надпровідники. Оскільки рівень розробок і досягнення в цих двох галузях різні, то перша частина присвячена виключно низькотемпературній електроніці, а у другій частині показані можливості і перспективи високотемпературної електроніки.

З точки зору застосувань надпровідникову електроніку можна розділити на дві категорії - так звану високоенергетичну і низькоенергетичну, або «силову» (сильнострумову, large-scale) та «слабку» (слабкострумову, small-scale) електроніку. Третя частина стосується слабкострумовим застосуванням – кріотрони, СКВІДи, магнітометрія, квантові комп'ютери

Підручник в першу чергу призначений для забезпечення навчальної дисципліни «Прикладна надпровідність», яка читається магістрам 2-го року навчання в рамках міждисциплінарної освітньо-наукової програми «Фізика інформаційних технрлогій», предметна область якої 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), та міжгалузевих програм, які охоплюють природничу (E), IT (F) та інженерну (G) галузі.

При створенні підручника допоміг досвід використання в навчальному процесі електронного навчального посібника «Надпровідникова електроніка», виданого в 2020 році [107]. За результатами цієї апробації до тексту посібника було внесено ряд змін, збільшено обсяг навчального матеріалу, зокрема, додано Частину 3, яка включає розділи 10–12, дещо змінилась структура інших розділів книги, що й привело до створення цього підручника.

Матеріал організовано наступним чином. У вступному розділі 1 розглянуто основні фізичні явища та моделі, потрібні для розуміння явища надпровідності, які будуть використані у наступних розділах. Автори сподіваються, що наявність в навчальному матеріалі такого вступного розділу забезпечить

засвоєння теоретичного матеріалу з мінімальним залученням додаткової літератури.

Розділи 2–6 (Частина 1) містить спеціалізований навчальний матеріал, присвячений основам електроніки на основі низькотемпературних надпровідників. Розд. 7–9 (Частина 2) містить матеріал, присвячений високотемпературній електроніці. Формально ці частини незалежні, проте рекомендується вивчати навчальний матеріал послідовно, починаючи з Частини 1, оскільки в посібнику досить часто проводяться порівняння навчального матеріалу поточного розділу з матеріалом попередніх розділів. Наприкінці кожного розділу наведено висновки щодо викладеного матеріалу і запитання для самоконтролю, корисні для самостійної роботи студентів.

За необхідності глибшого розуміння специфіки фізичних процесів у нанорозмірних системах, особливостей технології їхнього виготовлення та методик дослідження рекомендуємо звернутися до навчального посібника «Фізико-технологічні основи наноелектроніки» [108] та скористатись рекомендованою літературою. Також із [108] включено розділ 10, де описано основи кріотроніки та СКВІД-електроніки (Частина 3).

Крім того, сьогодні все більш популярним напрямом високих технологій, стає розвиток квантових обчислень. У цьому напрямку раніше було видано посібник «Вступ до квантових обчислень та квантових комп’ютерів» [109]. Проте, він призначався для студентів з комп’ютерної інженерії, в той час як фізико-технічні питання квантових комп’ютерів, в першу чергу стосуються галузі електроніки. Тому посібник завершується розділами 11-12, які присвячені цим питанням.

Наприкінці вважаємо за доречне привернути увагу студентів до кандидатської [2] та докторської дисертацій [110] першого автора, де міститься значний обсяг матеріалів, який в принципі виходить за рамки освітньої програми, але дозволить допитливим студентам поглибити свої знання у галузі надпровідникової електроніки, в першу чергу стосовно СКВІД застосувань.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
Перелік скорочень, позначень та символів	6
ЧАСТИНА 1 НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА НАДПРОВІДНІСТЬ	7
Вступ	7
Розділ 1. НАДПРОВІДНИЙ СТАН РЕЧОВИНИ	**13**
1.1. Основи фізики надпровідності	13
1.2. Ефекти Джозефсона	16
1.3. Динамічні процеси в джозефсонівських переходах	19
1.4. Вплив магнітного поля на джозефсонівський контакт	25
1.5. Квантова макроскопічна інтерференція в надпровідниках	28
1.6. Типи та характеристики джозефсонівських контактів	29
Висновки	32
Запитання для самоконтролю	34
Розділ 2. СТАНДАРТИ НАПРУГИ	**36**
2.1. Переваги джозефсонівських еталонів та мір напруги	36
2.2. Історія розвитку стандартів напруги	38
2.3. Розвиток технології виготовлення ланцюгів тисяч джозефсонівських переходів	43
2.3.1. Стандарти на SIS переходах	44
2.3.2. Стандарти на SNS переходах	46
2.3.3. Стандарти на SINIS та SNININS переходах	51
2.3.4. Послідовно-паралельна архітектура	53
2.4. Інші метрологічні та прецизійні прилади	55
2.4.1. Еталони (синтезатори) змінної/імпульсної напруги	55
2.4.2. Програмовані стандарти постійної напруги	57
2.4.3. Генератори каліброваних імпульсів	59
2.4.4. Цифрові еталони змінної напруги	61
Висновки	61
Запитання для самоконтролю	64

Розділ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ ПЕРЕХОДІВ ДЛЯ ПІКОСЕКУНДНИХ ВИМІРЮВАНЬ	**66**
3.1. Вступ та загальні відомості	66
3.2. Джозефсонівський дискретизатор	67
3.3. Дискретизатор з безпосереднім зв’язком	71
3.4. Генератор коротких імпульсів	72
3.5. Дискретизатор з переміщенням флуксонів у СКВІДах	74
3.6. Приклади застосування	77
3.7. Особливості охолодження до гелієвої температури	80
Висновки	83
Запитання для самоконтролю	83
Розділ 4. НАДПРОВІДНИКОВІ ОПТИЧНІ ПРИЙМАЧІ	**85**
4.1. Вступ та загальні відомості	85
4.2. Болометри	87
4.3. Болометри на краю надпровідного фазового переходу	92
4.4. Інші принципи побудови болометрів	102
4.5. Калориметри для детектування ІЧ та оптичного випромінювання	106
4.6. Калориметри для детектування рентгенівського випромінювання та іонізуючих частинок	110
4.7. Детектори для астрономії	112
Висновки	114
Запитання для самоконтролю	120
Розділ 5. НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ЗАСТОСУВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ	
5.1. Перспективи застосування в НВЧ електроніці	115
5.2. Генератори НВЧ коливань	116
5.3. Параметричні підсилювачі	119
5.4. Інші мікрохвильові застосування надпровідників	121
5.4.1 Резонатори	121
5.4.2. SIS-змішувачі	126
Висновки	128

Запитання для самоконтролю	129
Розділ 6. НАДШВИДКА ОДНОКВАНТОВА ЛОГІКА	
6.1. Динамічні властивості переходу Джозефсона	130
6.2. НОК-тригер	132
6.3. Основні схеми НОК-логіки	134
6.3.1. Принципи організації обробки інформації	134
6.3.2. *D*-елемент	135
6.3.3. НОК-інвертор	136
6.3.4. НОК-схеми диз'юнкції та кон'юнкції	137
6.3.5. Генератор і формувач тактових НОК-імпульсів	139
6.4. Наноелектронна елементна база НОК-логіки	140
Висновки	142
Запитання для самоконтролю	144
Частина 2 ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА НАДПРОВІДНІСТЬ	
Вступ	146
Розділ 7. НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ	
7.1. Перспективи застосування ВТНП надпровідників	150
7.2. Перспективні матеріали для НВЧ застосувань	152
7.3. Радіолокація та широкосмуговий зв’язок	157
7.3.1. Лінії затримки, лінії передачі, резонатори	158
7.3.2. Фільтри	160
7.4. Перспективи високотемпературних SIS переходів	169
7.4.1. SIS змішувачі з низькою шумовою температурою	169
7.4.2. Генератори терагерцового діапазону	169
7.4.3. СКВІД-підсилювачі гігагерцового діапазону	170
Висновки	171
Запитання для самоконтролю	172
Розділ 8. ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ВТНП ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИЛОВИХ СИСТЕМ	
8.1. Властивості високотемпературних надпровідників	173

8.2. Методи виготовлення масивних матеріалів та конструкційних компонентів (дроти, стрічки)	176
8.3. Перспективні високоенергетичні системи	181
8.3.1. Електромагніти	182
8.3.2. Електричні генератори	183
8.3.3. Електричні двигуни	184
8.3.4. Лінії електропередачі	184
8.3.5. Акумулятори електроенергії	185
8.3.6. Поїзди на магнітному підвісі	187
Висновки	187
Запитання для самоконтролю	189
Розділ 9. ВТНП ПРИЙМАЧІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ	
9.1. Переваги ВТНП болометрів	191
9.2. Принцип дії ВТНП болометрів	192
9.3. Практична реалізація ВТНП болометрів	194
9.4. Інші принципи побудови ВТНП детекторів теплового випромінювання	196
9.5. Принципи побудови ВТНП стандартів напруги	198
9.6. ВТНП дискретизатор	198
Висновки	200
Запитання для самоконтролю	208
Частина 3. КРІОТРОНИ, СКВІДИ ТА КВАНТОВІ ОБЧИСЛЕННЯ	**202**
Розділ 10. КРІОТРОНИ ТА СКВІДИ	
10.1. Довідка із загального курсу фізики	204
10.2. Надпровідна елементна база на кріотронах	205
10.3. Переходи та ефекти Джозефсона	208
10.4. Принцип роботи та будова СКВІДів	213
10.4.1. СКВІД з одним переходом Джозефсона	213
10.4.2. СКВІД з двома переходами Джозефсона	215
10.4.3. Градіометри магнітного поля	217

10.4.4. Вимірювання слабких магнітних полів	219
10.5. Багатоканальні магнітометри на СКВІДах	220
10.5.1. Магнітокардіографи	220
10.5. 2. Магнітоенцефалографи та томографи	223
10.6. Растрові мікроскопи на СКВІДах	225
Висновки	228
Запитання для самоконтролю	230
Розділ 11. ПРИНЦИПИ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ	**231**
11.1. Основні положення квантової механіки, важливі для квантових обчислень	232
11.2. Кубіт – основа квантової інформатики	235
11.3. Квантовий регістр та сплетені стани	240
11.4. Квантові логічні операції, їх особливості	243
11.5. Квантові алгоритми та обчислення, їх переваги	247
11.6. Декогеренція і квантова корекція помилок	249
11.7. Вимоги до елементної бази квантового процесора	252
11.8. Можливі шляхи реалізації кубітів	254
Висновки	256
Запитання для самоконтролю	260
Розділ 12. НАДПРОВІДНИКОВІ КВАНТОВІ ПРОЦЕСОРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ ДЖОЗЕФСОНА	**262**
12.1. Зарядові кубіти	262
12.2. Потокові кубіти	267
12.3. Фазові кубіти	271
12.4. Зарядово-фазові кубіти	272
12.5. Маніпулювання квантовим станом кубітів	274
12.6. Шляхи оптимізації надпровідних кубітів	279
12.7. Організація кубітів у квантовий процесор	281
12.8. Реалізація квантових процесорів	285
Висновки	290
Запитання для самоконтролю	293
Список рекомендованої літератури	295