

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Фізика напівпровідників та нанорозмірних напівпровідникових систем
(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)
спеціальність 104 Фізика та астрономія
(шифр і назва спеціальності)
освітній рівень бакалавр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма Фізика
(назва освітньої програми)
спеціалізований
вибірковий блок Фізика наноструктур в металах та кераміках
вид дисципліни вибіркова *8С14*

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2021/2022</u>
Семестр	<u>8</u>
Кількість кредитів ECTS	<u>4</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>іспит</u>

Викладачі: професор Коротченко Олег Олександрович

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

Розробник¹: Коротченков Олег Олександрович, доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри загальної фізики
(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри



(підпис)

(Боровий М.О.)

(прізвище та ініціали)

Протокол № 10 від 18 травня 2021 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол №4 від 22 червня 2021 року

Голова науково-методичної комісії



(підпис)

(Оліх О.Я.)

(прізвище та ініціали)

¹ Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (раді навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – отримання глибоких та систематизованих знань з фізики напівпровідників та основ фізики низькорозмірних напівпровідників, що включає засвоєння основних явищ та фізичних закономірностей, оволодіння методами і принципами як теоретичного розв'язку фізичних проблем, так і планування та виконання фізичного експерименту в галузі фізики низькорозмірних напівпровідникових систем.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати

основні питання фізики твердих тіл, зокрема: математичне формулювання та фізичний зміст основних понять фізики твердих тіл, її сучасний стан, застосування твердих тіл у приладах і пристроях;

2. Вміти

застосовувати на практиці методи квантової механіки та фізики твердого тіла, необхідні для опису властивостей напівпровідників та низькорозмірних напівпровідникових систем; логічно і послідовно формулювати основні закономірності кінетичних явищ в твердих тілах; самостійно працювати з науковою літературою, включаючи англійські видання, в галузі фізики напівпровідників та напівпровідникових наносистем;

3. Володіти

основними навичками розв'язку типових задач квантової механіки та фізики твердого тіла, методами розрахунку параметрів рівноважної та не рівноважної статистики носіїв заряду у твердих тілах та розрахунків з використанням кінетичного рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

В рамках курсу «Фізика напівпровідників та нанорозмірних напівпровідникових систем» розглядаються як класичні, так і сучасні досягнення в області опису фізичних закономірностей та практичного використання напівпровідників та напівпровідникових нанорозмірних систем.

Метою вивчення дисципліни є засвоєння загальних положень фізики напівпровідників та напівпровідникових наносистем, зокрема, рівноважної статистики електронів та дірок в напівпровідниках, кінетичних явищ, властивостей поверхні напівпровідників, явища екранування носіїв заряду, приповерхневого квантування, основи ємнісної спектроскопії, процесів саморегулювання при одержанні низькорозмірних напівпровідникових структур.

Навчальна задача курсу полягає в оволодінні основними методами одержання та дослідження напівпровідників та напівпровідникових наносистем, включаючи квантові ями, дроти, точки, надгратки.

Результати навчання полягають в умінні застосовувати знання із основ функціонування та застосування напівпровідників та низькорозмірних напівпровідникових систем. Методи викладання: лекції, консультації, самостійна робота.

Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, контрольні роботи після основних розділів спецкурсу, залік. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (60%) та іспиту (40%).

4. Завдання (навчальні цілі) – ознайомлення студентів з фізичними основами функціонування напівпровідників та низькорозмірних напівпровідникових систем та основами напівпровідникових технологій.

Згідно вимог Стандарту вищої освіти України (перший (бакалаврський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Природничі науки»), спеціальність 104 «Фізика та астрономія» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей**:

Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

Загальних:

- ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ЗК2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- ЗК4. Здатність бути критичним і самокритичним.
- ЗК5. Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- ЗК8. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт.
- ЗК12. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.

Фахових:

- ФК1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.
- ФК2. Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів.
- ФК9. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.
- ФК10. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.
- ФК11. Розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю.
- ФК12. Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень.
- ФК13. Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук.
- ФК14. Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту.
- ФК15. Здатність аналізувати світові тренди розвитку фізики та астрономії для вибору власної

5. Результати навчання за дисципліною: (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація*; 4. автономність та відповідальність*)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
I	Знати фізичні основи функціонування напівпровідників та низькорозмірних напівпровідникових систем; принцип дії та призначення основних типів фізичних вимірювальних приладів, застосованих для вивчення	Лекції, самостійна робота	Модульні контрольні роботи, перевірка самостійної роботи,	60

* заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

	напівпровідників та низькорозмірних напівпровідників; основні сучасні досягнення фізики низькорозмірних напівпровідників та їх застосування у практичних пристроях.		<i>опитування в процесі лекції, залік.</i>	
2	Вміти досліджувати електричні, оптичні та фотоелектричні властивості напівпровідників та низькорозмірних напівпровідникових структур.	<i>Лекції, самостійна робота</i>	<i>Модульні контрольні роботи, перевірка самостійної роботи, опитування в процесі лекції, залік.</i>	40

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркового навчання)

Результати навчання дисципліни		1	2
Програмні результати навчання			
ПРН1. Знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та астрономії.		+	+
ПРН3. Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій.		+	+
ПРН4. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання.		+	
ПРН5. Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії.		+	
ПРН6. Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії.		+	
ПРН7. Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації.			+
ПРН8. Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань.		+	
ПРН9. Мати базові навички проведення теоретичних та/або			+

експериментальних наукових досліджень з окремих спеціальних розділів фізики або астрономії, що виконуються індивідуально (автономно) та/або у складі наукової групи.		
ПРН13. Розуміти зв'язок фізики та астрономії з іншими природничими та інженерними науками, бути обізнаним з окремими (відповідно до спеціалізації) основними поняттями прикладної фізики, матеріалознавства, інженерії, хімії, біології тощо, а також з окремими об'єктами (технологічними процесами) та природними явищами, що є предметом дослідження інших наук і, водночас, можуть бути предметами фізичних або астрономічних досліджень.	+	
ПРН15. Знати, аналізувати, прогнозувати та оцінювати основні екологічні аспекти загального впливу промислово-технологічної діяльності людства, а також окремих фізичних і астрономічних явищ, наукових досліджень та процесів (природних і штучних) на навколишнє природне середовище та на здоров'я людини.		+
ПРН17. Знати і розуміти роль і місце фізики, астрономії та інших природничих наук у загальній системі знань про природу та суспільство, у розвитку техніки й технологій та у формуванні сучасного наукового світогляду.	+	
ПРН18. Володіти державною та іноземною мовами на рівні, достатньому для усного і письмового професійного спілкування та презентації результатів власних досліджень.	+	
ПРН23. Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії.	+	
ПРН24. Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій.	+	
ПРН25. Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітніх траєкторій та професійного розвитку.		+
ПРН26. Мати базові навички самостійної оцінки рівня освітніх програм з фізики та астрономії у глобальному освітньому просторі для вибору цілеспрямованих візитів по програмі академічної мобільності.	+	
ПРН28. Мати уявлення про трансдисциплінарний шлях розвитку науки та його значення для вибору майбутньої освітньої траєкторії.	+	+

7. Структура курсу

Курс складається з 2-х змістових модулів: «Фізичні основи функціонування напівпровідників» та «Фізичні основи функціонування низькорозмірних напівпровідникових систем».

8. Схема формування оцінки:

8.1 Форми оцінювання студентів: (зазначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).
2. Модульна контрольна робота 2 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).

- підсумкове оцінювання у формі заліку

Підсумкове оцінювання у формі екзамену¹: (обов'язкове проведення екзаменаційного оцінювання в письмовій формі)

	ЗМ1/Частина 1 (за наявності)	ЗМ2/Частина 2 (за наявності)	залік	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>18</u>	<u>18</u>	<u>24</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>100</u>

у випадку комплексного екзамену слід вказати питому вагу складових

Студент не допускається до заліку, якщо під час семестру набрав менше 36 балів.²

(слід чітко прописати умови, які висуваються викладачами даної дисципліни).

Оцінка за залік не може бути меншою **24 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

8.2 Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням, у тому числі, результатів навчання, опанування яких перевіряється конкретним оцінюванням).

Шкала відповідності

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно з можливістю повторного складання / Fail	35-59
Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни / Fail	0-34
Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

¹ Семестрову кількість балів формують бали, отримані студентом у процесі теоретичного засвоєння матеріалу з усіх розділів дисципліни, семінарських занять, виконання практичних, лабораторних, індивідуальних, підсумкових контрольних робіт, творчих робіт впродовж семестру, передбачених робочою навчальною програмою (**100 балів** - для залікових дисциплін, у випадку, якщо дисципліна завершується екзаменом, то розподіл здійснюється за таким алгоритмом: **60 балів (60%) – семестровий контроль і 40 балів (40%) – екзамен**).

² У випадку, коли дисципліна завершується екзаменом не менше – **20 балів**, а рекомендований мінімум **не менше 36 балів**, оскільки якщо студент на екзамені набрав менше **24 балів** (а це 60% від 40 балів, відведених на екзамен), то вони **не додаються** до семестрової оцінки незалежно від кількості балів, отриманих під час семестру, а в екзаменаційній відомості у графі «результуюча оцінка» переноситься лише кількість балів, отриманих під час семестру.

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
Частина 1. Фізичні основи функціонування напівпровідників				
1	<p>Тема 1. Вступ. Статистика носіїв заряду у власному та домішковому напівпровіднику.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Предмет курсу. Класифікація твердих тіл за величиною питомого опору та заповненням енергетичних зон. Власна та домішкова провідність, її температурна залежність. Холлівська та дрейфова рухливість. Визначення знаку заряду носіїв. Основні властивості та приклади застосування напівпровідникових матеріалів. Вищування й легування об'ємних напівпровідникових кристалів (метод Чохральського, метод зонної плавки). Основні відмінності напівпровідників, металів та діелектриків з точки зору зонної теорії. Тензор ефективних мас. Ізоенергетичні поверхні. Приклади зонних структур напівпровідників: зони провідності кремнію, германію, арсеніду галію. Прямозонні й непрямозонні напівпровідники. Застосування напівпровідників у приладах з переносом заряду.</p> <p>Статистика носіїв заряду. Густина станів та функція розподілу електронів по квантових станах. Концентрація електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні для власного напівпровідника. Ефективна густина станів електронів та дірок в зонах. Невироджений електронний (дірковий) газ. Обчислення положення рівня Фермі у власному напівпровіднику та його зміна при зміні температури та параметрів напівпровідника. Рівень Фермі для напівпровідника з домішками одного типу.</p>	8		8
2	<p>Тема 2. Кінетичні явища у напівпровідниках. Електропровідність напівпровідників та рухливість носіїв заряду.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Кінетичне рівняння Больцмана: електропровідність напівпровідників, рухливість носіїв заряду та її залежність від температури при різних механізмах розсіяння. Рівняння неперервності. Дифузійний та дрейфовий струми. Співвідношення Ейнштейна. Зв'язок густини струму з градієнтом квазірівня Фермі. Релаксація об'ємного заряду, максвеллівський час релаксації.</p>	4		8
3	<p>Тема 3. Нерівноважні електрони й дірки.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Виникнення нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках. Оптична генерація. Темпи генерації й рекомбінації; час життя. Співвідношення між часами релаксації енергії й імпульсу та часом життя. Квазірівновага та квазірівні Фермі. Фотопровідність. Домішкова і власна фотопровідність. Стаціонарне час життя, часи релаксації і стаціонарна величина фотопровідності в умовах низького рівня збудження.</p>	6		10
4	<p>Тема 4. Властивості поверхні напівпровідників. Контакт метал-напівпровідник.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до підсумкової модульної контрольної роботи.</p> <p>Поверхневі рівні і поверхневі зони. Рівні Тамма. Поверхневий вигин зон і ширина області об'ємного</p>	6		12

	заряду. Збагачений, збіднілий і інверсійний шари на поверхні напівпровідника. Поверхнева провідність. Залежність поверхневої провідності від поверхневого потенціалу. Ефект поля. Застосування ефекту поля для визначення енергетичного спектру поверхневих рівнів. Поверхнева рекомбінація. Швидкість поверхневої рекомбінації. Вплив поверхневої рекомбінації на фотопровідність. Контакт метал-напівпровідник. Енергетична діаграма контакту метал-напівпровідник. Розподіл напруженості електричного поля, об'ємного заряду й потенціалу у збідненому та збагаченому шарах. Бар'єр Шоттки. Бар'єрна ємність контакту метал-напівпровідник.			
	Контрольна робота 1	1		
Частина 2. Фізичні основи функціонування низькорозмірних напівпровідникових систем				
5	Тема 5. Просторово-неоднорідні рівноважні розподіли концентрацій носіїв заряду. Екранування. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Рівняння Пуассона у k -просторі. Радіус екранування в рамках теорії Дебая-Хюккеля та Фермі-Томаса.	4		8
6	Тема 6. Енергетичні діаграми p - n -переходу. Дифузійна та бар'єрна ємності. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. p - n -перехід та його енергетична діаграма. Ємність p - n -переходу. Приповерхнєве квантування. Інжекція неосновних носіїв заряду в p - n -переході. Фотоелектричні властивості p - n -переходів.	6		8
7	Тема 7. Ємнісна спектроскопія низькорозмірних напівпровідникових систем. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Ємнісна спектроскопія квантових точок. Вольт-фарадні характеристики. Вимірювання стаціонарної та нестаціонарної ємності у темряві і при освітленні. Нестаціонарна ємнісна спектроскопія глибоких рівнів для дослідження наноструктур.	4		10
8	Тема 8. Методи отримання пліткових квантово-розмірних структур. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до модульної контрольної роботи 1. Вимоги до технології отримання квантово-розмірних структур на основі гетеропереходів. Хімічні аналоги. Близькість сталих ґратки. Різкість гетеромежі. Основні методи отримання плівок. Хімічне осадження з газової фази. Парофазна епітаксія з металоорганічних сполук. Молекулярно-пучкова епітаксія. Електрохімічне осадження. Фізичні основи методів, заснованих на використанні скануючих зондів. Атомна інженерія. Зондові методи створення низькорозмірних структур.	4		12
	Підсумкова модульна контрольна робота	1		
	ВСЬОГО	44		76

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 120 год.³, в тому числі:

Лекцій – 44 год.

Семінари – 0 год.

Практичні заняття – 0 год.

Лабораторні заняття – 0 год.

Тренінги – 0 год.

³ Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

Консультації - ___ год.
Самостійна робота - 80 год.

Питання для самостійної роботи

1 модуль

1. Кінетичні ефекти в двовимірних системах: час релаксації та рухливість, вертикальний перенос в системі квантових ям.
2. Кінетичні явища в сильних магнітних полях. Дробний квантовий ефект Холла.
3. Домішкові стани в напівпровідникових системах зниженої розмірності.
4. Кулонівські зв'язані стани та інтерфейсні дефекти в гетеро структурах.
5. Технологія вирощування Si/Ge гетероструктур.

2 модуль

1. Квантовий транспорт: ідеї локалізації, термоактивована провідність в режимі локалізації, теорія Таулесса.
2. Виміри магнітних полів методами квантової магнітометрії.
3. Біомедичні наноструктури: мікро/нанодвигуни та їх біомедичне застосування, новітні наноструктури як молекулярні нанодвигуни, наноструктури для транспорту ліків.
4. Епітаксія монокристалічних плівок. Гомо- і гетероепітаксія. Основи теорії зародкоутворення і зростання епітаксійних плівок при їх вирощуванні з газоподібних фаз.
5. Термодинамічний і молекулярно-кінетичний підхід до опису гетероепітаксії.
6. Методи рідинної епітаксії. Епітаксія з газоподібної фази: метод хімічних реакцій, газотранспортна епітаксія. Конденсація з парової фази.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА⁴:

Основна: (Базова)

1. Коротченков О. О., Надточій А.Б. Вступ до фізики низькорозмірних напівпровідникових систем. Дослідження теплових та термоелектричних властивостей тонких плівок. Вінниця, Видавництво ТОВ «Нілан-ЛТД», 2021 – 76 с.
<https://gen.phys.univ.kiev.ua/biblioteka/pidruchniki-ta-posibniki/>
2. Подолян А.О., Коротченков О. О. Фізика низькорозмірних напівпровідників. Генерація та рекомбінація нерівноважних носіїв заряду. Фотоелектричний ефект. Вінниця, Видавництво ТОВ «Твори», 2018 – 4 друк. арк. <https://gen.phys.univ.kiev.ua/biblioteka/pidruchniki-ta-posibniki/>
3. Третяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників. К.: ВПЦ "Київський університет", 2007. – Т. 1. Доступ за адресою: [Третяк, Лозовський. Основи фізики напівпровідників \(kspu.edu\)](http://kspu.edu)
4. Третяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників. К.: ВПЦ "Київський університет", 2007. – Т. 2. Доступ за адресою: [Tretyak_Lozovsky_2.pdf \(radfiz.org.ua\)](http://radfiz.org.ua)
5. Ільченко В. І., Обухова Т. Ю. Фізика напівпровідників: Конспект лекцій (Частина І)[Електронний ресурс]: К : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. Доступ за адресою: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37599/1/Fizyka_napivprovidnykiv-1.pdf
6. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С.И. Фізика полупроводников. М.: Наука, 1990. [Бібліотека фізичного факультету.](#)
7. Шалимова К. В. Фізика полупроводников. М.: Изд-во URSS, 2016. https://www.bambook.com/book/rus/fizika-poluprovodnikov-4364356?gclid=EAIaIQobChMIhtXKIPnX9QIVAwB7Ch1nWQlvEAQYAABEgIdFvD_BwE
8. Ансельм А. И. Введение в физику полупроводников. М.: Наука, 1985. [Бібліотека фізичного факультету.](#)
9. Шпак А.П., Куницький Ю.А., Коротченков О.О., Смик С.Ю. Квантові низькорозмірні системи. Київ: Академперіодика, 2003. – 312 с. [Бібліотека фізичного факультету.](#)
10. Гридчин В.А., Драгунов В.П., Неизвестный И.Г. Основы нанoeлектроники: Учебное пособие. М.: Физматкнига, 2006. – 496 с.
<https://bookstor.com.ua/knigi/obrazovanie/gumanitarnye-nauki/osnovy-nanoelektroniki-uchebnoe-posobie-1612232.html>; Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського

Додаткова:

1. Зеєгер К. Фізика полупроводников. М.: Мир, 1977. [Бібліотека фізичного факультету.](#)
2. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури[Електронний ресурс]: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. http://bookwu.net/book_nanoelektronika-2-chast_1021
3. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Якименко Ю.І. Нанофізика, наноматеріали, нанoeлектроніка: Навчальний посібник для студ. ВНЗ. — К. : НТУУ "КПІ", 2012. Доступ за адресою: http://me.kpi.ua/downloads/Poplavko_Nanophysics_2012.pdf

⁴ В тому числі Інтернет ресурси