

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Навчально-науковий інститут високих технологій**

Кафедра нанофізики конденсованих середовищ



**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**Нерівноважні процеси в твердих тілах  
для студентів**

**галузь знань** 10 Природничі науки  
**спеціальність** 105 Прикладна фізика та наноматеріали  
**освітній рівень** бакалавр  
**освітня програма** Нанофізика та комп'ютерні технології  
**вид дисципліни** обов'язкова

Форма навчання	денна
Навчальний рік	2021/2022
Семестр	7
Кількість кредитів ECTS	5.0
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Форма заключного контролю	іспит

Викладач: Скришевський Валерій Антонович, завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

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

на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)

**КИЇВ – 2021**

Розробник:

Скришевський Валерій Антонович, доктор фіз-мат наук, професор, завідувач кафедри

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

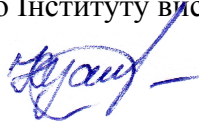
 Валерій СКРИШЕВСЬКИЙ  
(підпис)

Протокол №8 від «26» лютого 2021 р.

Схвалено науково - методичною комісією Інституту високих технологій

Протокол від «05» березня 2021 року №3

Голова науково-методичної комісії



Русінчук Н.М.

## ВСТУП

### 1. Мета дисципліни

Метою вивчення дисципліни є ознайомлення студентів із фізичними явищами, які покладено в основу роботи сучасних приладів напівпровідникової опто-, мікро- та нано-електроніки в оптичному діапазоні, а саме: генераційно-рекомбінаційними процесами та механізмами переносом заряду, експериментальними методиками визначення основних параметрів напівпровідників.

### 2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

Навчальна дисципліна «**Нерівноважні процеси в твердих тілах**» базується на циклі дисциплін професійної та практичної підготовки, зокрема таких як «Електрика та магнетизм», «Оптика», «Атомна фізика», «Квантова механіка», «Диференціальні рівняння», «Основи фізики твердого тіла», «Радіоелектроніка», «Коливання та хвилі».

### 3. Анотація навчальної дисципліни:

У програмі дисципліни розглядаються процеси розповсюдження електромагнітних хвиль оптичного діапазону в напівпровідниках та діелектриках, механізмами поглинання світла в напівпровідниках та квантоворозмірних структурах, електро- та магнітооптичні явища, процеси рекомбінації нерівноважних носіїв заряду, механізми випромінювальної та безвипромінювальної рекомбінації, властивості фотопровідності, фотоелектричні ефекти при врахуванні дифузії та дрейфу, механізмами формування фото-ЕРС в напівпровідникових гетероструктурах, принцип роботи різних типів сонячних елементів. Також розглядаються оптичні та фотоелектричні методи визначення феноменологічних параметрів напівпровідників.

### 4. Завдання (навчальні цілі)

*ІК: Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми прикладної фізики та наноматеріалів у галузі нанофізики та наноматеріалознавства, пов'язані із виготовленням, аналізом властивостей, використанням наноматеріалів, проектування та виготовлення нанорозмірних систем з використанням комп'ютерних технологій, що передбачає застосування теорій та методів фізики, математики та інженерії, програмування, вибраних розділів хімії та біології й характеризується комплексністю та невизначеністю умов.*

*ЗК 1 Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.*

*ЗК 2 Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.*

*ЗК 3 Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.*

*ЗК 4 Здатність спілкуватися іноземною мовою*

*ЗК 6 Здатність до проведення досліджень на відповідному рівні*

*ЗК 7 Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.*

*ЗК 9 Здатність працювати автономно.*

*ЗК 10 Навички здійснення безпечної діяльності*

*ЗК 14 Здатність бути критичним і самокритичним.*

*ЗК 18 Здатність працювати в команді.*

*ФК2 Здатність брати участь у плануванні і виконанні експериментів та лабораторних досліджень властивостей фізичних систем, фізичних явищ і процесів, обробленні й презентації їхніх результатів.*

*ФК3 Здатність брати участь у виготовленні експериментальних зразків, інших об'єктів дослідження.*

ФК5 Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп'ютерних технологій.

ФК6 Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем.

ФК7 Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.

ФК9 Здатність використовувати знання про фізичну природу об'єктів у роботах по створенню нових приладів, апаратури, обладнання, матеріалів і речовин, зокрема, наноматеріалів чи удосконалення існуючих.

ФК11 Здатність використовувати комп'ютерні технології при проектуванні, розробці та діагностиці електронного обладнання.

ФК12 Вибірковий блок 1 Здатність розробляти, діагностувати та використовувати пристрої електроніки в сучасній науці.

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

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація <sup>1*</sup> ; 4. автономність та відповідальність <sup>2*</sup> )		Форми (та/або методи і технології) викладання і навчання	Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання (за необхідності)	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1	студент повинен <b>знати</b> :	<i>Лекції</i>	письмові модульні контрольні роботи, оцінювання виконання завдань для самостійної роботи	60%
1.1	Механізми поглинання електромагнітних хвиль оптичного діапазону в твердому тілі та квантово-розмірних структурах			
1.2	Електро- та Магнітооптичні явища в напівпровідниках та діелектриках, циклотронний резонанс		--	
1.3	Властивості випромінювальної та безвипромінювальної рекомбінації, рекомбінації Шоклі-Ріда, Оже-рекомбінації			
1.4	Феноменологічний опис фотопровідності напівпровідників. Фотоелектричні явища при врахуванні дифузії та дрейфу			
1.5	Види фотоЕРС- фотоЕРС Дембера, фото електромагнітний ефект, фотоЕРС в р-п переході та гетероструктурах			
2	студент повинен <b>вміти</b> :	<i>Практичні та лабораторні роботи</i>	письмові модульні контрольні роботи, оцінювання виконання завдань для самостійної роботи	30%
2.1	Користуватись Довідниками з табличними параметрами напівпровідникових матеріалів, Переводити позасистемні одиниці в основні та похідні міжнародної системи одиниць вимірювання СІ			

<sup>1\*</sup> заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

2.2	Розраховувати параметри напівпровідників – час життя та рухливість носіїв заряду, спектральні залежності коефіцієнтів поглинання, фотопровідності, довжину дифузії.			
2.3	Розв'язувати дифузійно - дрейфові та генераційно-рекомбінаційні рівняння			
3	<b>Комунікація</b>			
3.1	Вміти донести інформацію до аудиторії про досягнення та проблеми сучасних оптоелектронних пристроїв	<i>Практичні та лабораторні роботи</i>	оцінювання виконання завдань для самостійної роботи	
	<b>автономність та відповідальність</b>	<i>Семинар, самостійна робота</i>	оцінювання виконання завдань для самостійної роботи	10%
4.1	продемонструвати автономність та розуміння особистої відповідальності за професійні рішення при вивченні курсу			

## 6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання

<b>Результати навчання дисципліни</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.5</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>3.1</b>	<b>4.1</b>
<b>Програмні результати навчання</b>										
ПРН 1 Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики. ПРН 1	+	+	+	+	+					
ПРН 2 Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.							+	+		
ПРН 3 Застосовувати ефективні технології, інструменти та методи експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв'язанні практичних проблем прикладної фізики.							+	+		
ПРН 4 Застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів і наукоємних технологій.							+	+		
ПРН 6 Відшукувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність та релевантність інформації.						+				+
ПРН 8 Вільно спілкуватися з професійних питань державною та англійською мовами усно та письмово.	+	+	+	+	+				+	+
ПРН 13 Оцінювати фінансові, матеріальні та інші витрати, пов'язані з реалізацією проектів у сфері прикладної фізики, соціальні, екологічні та інші потенційні наслідки реалізації проектів. ПРН 13	+	+	+	+	+					
ПРН 14 Організувати результативну роботу індивідуально і як член команди.						+	+	+	+	+
ПРН 15 Розробляти та формулювати свої професійні висновки та розумно їх аргументувати для фахової та нефахової аудиторії. ПРН 15	+	+	+	+	+					



*Розрахунок балів, які студент отримує при успішній здачі іспиту:*

	Змістовий модуль 1	Змістовий модуль 2	Іспит	Підсумкова оцінка
<i>Мінімум</i>	<i>15</i>	<i>15</i>	<i>24</i>	<i>60</i>
<b>Максимум</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>100</b>

### **7.3 Шкала відповідності оцінок**

<b>Відмінно / Excellent</b>	90-100
<b>Добре / Good</b>	75-89
<b>Задовільно / Satisfactory</b>	60-74
<b>Незадовільно / Fail</b>	0-59
<b>Зараховано / Passed</b>	60-100
<b>Не зараховано / Fail</b>	0-59

## 8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекційних занять

№ п/п	Назва теми*	Кількість годин		
		лекції	практичні	лабораторні
<b>Частина 1 Оптичне поглинання, електро- та магніто-оптичні явища</b>				
1	<b>Тема 1</b> Вступ. Історія розвитку оптоелектроніки. Фізичні проблеми при дослідженні нерівноважних явищ у напівпровідниках	2	2	
2	<b>Тема 2.</b> Оптична дисперсія в твердому тілі. Класична та квантово-механічна теорія дисперсії в діелектриках.. Співвідношення Крамерса-Кроніга. Поглинання вільними носіями. Формула Друде. Плазмове відбивання.	2		
3	<b>Тема 3.</b> Механізми поглинання світла. Принцип Франка-Кондона. Прямі та непрямі оптичні переходи. Вплив тиску, температури та концентрації носіїв на край власного поглинання. Ефект Бурштейна-Моса. Правило Урбаха. Екситони Френкеля та Ванье-Мотта. Енергетичний спектр екситонів та екситонне поглинання. Домішкове поглинання. Поглинання в квантових ямах	4	6	3
4	<b>Тема 4.</b> Електрооптичні явища. Ефект Франца-Келдиша. Методи електровідбивання. Модуляційна спектроскопія. Подвійне променезаломлення. Ефект Керра та Поккельса.	2	2	3
5	<b>Тема 5.</b> Магнітооптичні явища. Циклотронний резонанс. Рівні Ландау. Ефект Зеемана. Ефекти Фарадея і Фойгта. Магніто-осциляційний та магнітоабсорбційний ефекти. Електронний парамагнітний резонанс.	2	2	
	<i>Модульна контрольна робота 1</i>	x	x	
	<i>Всього</i>	12	12	6
<b>Частина 2 Рекомбінація та фотоелектричні явища</b>				
6	<b>Тема 6</b> Механізми рекомбінації. Міжзонна рекомбінація. Рекомбінація через локальні центри. Рекомбінація Шоклі-Ріда-Хола. Вплив рівня освітлення та температури на стаціонарний час життя. Поняття про s та g центри та центри прилипання. Каскадна модель Лекса.	4	4	
7	<b>Тема 7</b> Види випромінювальних переходів. Теорія ван Русбрека-Шоклі. Квантовий вихід. Екситонна рекомбінація. Випромінювальна міжзонна рекомбінація. Ефект самопоглинання. Домішкова випромінювальна рекомбінація. Випромінювальна та безвипромінювальна рекомбінація. Оже процес. Поверхнева рекомбінація.	2	2	4
8	<b>Тема 8</b> Феноменологічний опис фотопровідності. Релаксація нерівноважної фотопровідності. Миттєвий час життя. Визначення основних феноменологічних параметрів з дослідження стаціонарної фотопровідності та кінетики фотопровідності. Індукована домішкова фотопровідність. Термостимульована провідність.	2	2	
9	<b>Тема 9</b> Фотоелектричні ефекти при врахуванні дифузії. Розрахунок координатного розподілу концентрації нерівноважних носіїв заряду, об'ємного заряду та поля в умовах неоднорідної генерації. Визначення часу життя, рухливості та довжини дифузійного зміщення. Амбіполярна дифузія та дрейф.	4	4	4
10	<b>Тема 10.</b> Види фотоЕРС. ФотоЕРС Дембера, фото електромагнітний ефект, фотоЕРС в р-п переході та гетеро структурах.. Використання фотоелектромагнітного ефекту для визначення довжини дифузійного зміщення та швидкості поверхневої рекомбінації.	4	4	
	<i>Модульна контрольна робота 2</i>	x	x	
	<i>Всього</i>	16	16	8



	<b>ВСЬОГО<sup>3</sup></b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>14</b>
--	---------------------------	-----------	-----------	-----------

**Загальний обсяг навчальних** 70 год.<sup>4</sup>, в тому числі (вибрати необхідне):

Лекцій – **28** год.

Практичні заняття - **28** год.

Лабораторні заняття - **14** год.

Тренінги - \_\_\_\_\_ год.

Консультації - \_\_\_\_\_ год.

Самостійна робота - **80** год.

### **САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТІВ**

Індивідуальні розрахункові завдання – див. Г.П.Пека, О.В.Третяк, В.В. Кислюк, Збірник задач з фізики напівпровідників та напівпровідникових приладів., К. Київський університет, 2002.

### **9. Рекомендовані джерела<sup>5</sup>:**

*Основна: (Базова)*

1. О.В.Третяк, В.З.Лозовський, Основи фізики напівпровідників, ВПЦ КУ, т.2, 2008.
2. С.В.Кондратенко, О.В. Вакуленко, Фотоелектричні ефекти в напівпровідниках, ВПЦ КУ, 2009.
3. Царенко О.М. Основи фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів: навчальний посібник . – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2011. – 243 с
4. Савчин В.П., Іжнін І.І., Веков М.М. Напівпровідникова фотоелектроніка.- Львів: Вид-во ЛНУ.-2010.-728 с.
- 5 Попик Ю.В. Фізика напівпровідників: підруч. для студентів вищих навч. закл. Ужгород : ТОВ “ІВА”, 2014. – 820 с.
6. Пека Г.П., Стріха В.І. Поверхневі та контактні явища у напівпровідниках.- Київ: “Либідь”.- 1992.- 238 с.
- 7.В.О. Чадок. Оптоелектроніка: від макро до нано.- К.:НТУУ “КПІ”, 2012.- 406 с.

*Додаткова:*

1. Neamen D. Semiconductor Physics and Devices.-N.Y.:McGraw-Hill, 2003
2. В.А.Скришевський, Фізичні основи напівпровідникових хімічних сенсорів, Київ, Київський університет, 2006
3. Фізичне матеріалознавство: навч. посіб./ Ю.М. Поплавко, В.І. Ільченко,С.О. Воронов, Ю.І. Якименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Ч.4. Напівпровідники.
4. Фізика напівпровідників: Конспект лекцій (Частина I)[Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро-та наноелектроніка»/В. І. Ільченко, Т. Ю. Обухова.; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Електронні текстові данні (1 файл: 2,97 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.– 26 с

### **10. Додаткові ресурси (за наявності):**

<sup>3</sup> У робочій програмі навчальної дисципліни для лекційних, семінарських, практичних і лабораторних занять зазначається *реальна* кількість годин (*кратне 2 год. – час тривалості пари*).

<sup>4</sup> Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

<sup>5</sup> В тому числі Інтернет ресурси