

**Чернівецький національний університеті мені Юрія Федьковича**

Навчально-науковий Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра електроніки і енергетики

**СИЛАБУС**  
**навчальної дисципліни**

**“ Оптичні і фотоелектричні явища в напівпровідниках”**

вибіркова

Освітньо-професійна програма **“Мікро- та наносистемна техніка”**

Спеціальність № 153 “Мікро- та наносистемна техніка”

Галузь знань 15 “Автоматизація та приладобудування”

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Навчально-науковий Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Мова навчання українська

Розробники: Стребежев Віктор Миколайович, доцент, к.ф.-м.н., доцент

**Профайл викладача (-ів)**

<http://ptcsi.chnu.edu.ua/teachers/%d1%81%d1%82%d1%80%d0%b5%d0%b1%d0%b5%d0%b6%d0%b5%d0%b2-%d0%b2%d1%96%d0%ba%d1%82%d0%be%d1%80-%d0%bc%d0%b8%d0%ba%d0%be%d0%bb%d0%b0%d0%b9%d0%be%d0%b2%d0%b8%d1%87>

**Контактний тел.** 0992624184

**E-mail:** v.strebezhev@chnu.edu.ua

**Сторінка курсу в Moodle** <https://moodle.chnu.edu.ua/course/view.php?id=1097>.

**Консультації**

Очні консультації: **вівторок з 16.30 до 17.30**

Онлайн-консультації: **вівторок з 16.30 до 18.00**

Очні консультації: за попередньою домовленістю: **середа з 16.10 до 17.10**

## **1. Анотація дисципліни (призначення навчальної дисципліни)**

Курс “Оптичні і фотоелектричні явища в напівпровідниках” для студентів закладів вищої освіти є навчальною дисципліною з вивчення фізичних основ взаємодії електромагнітного випромінювання з напівпровідниками та структурами на їх основі.

Курс включає в себе розгляд основних механізмів поглинання світла в напівпровідниках, процесів фотоіонізації та взаємодії фотозбуджених носіїв заряду з кристалічною ґраткою кристала, що визначають основні параметри оптичних і фотоелектричних матеріалів і приладів, виготовлених на їх основі.

Аналізується ефективність процесів, які протікають в напівпровідникових кристалах і структурах при освітленні і залежать від ряду факторів: чистота матеріалу й досконалість кристалічної ґратки, енергія фотонів та інтенсивність випромінювання, температура, тиск, електричні і магнітні поля.

Особлива увага в курсі приділяється вивченню фізичних явищ та ефектів, які виникають під дією світла в напівпровідниках (зміна електропровідності, виникнення електрорушійних сил), що лежать в основі нових конструктивних видів апаратури опто- і фотоелектроніки: ІЧ-фільтрів, імерсійних лінз, фотодіодів, фотоопорів, фотоприймачів, фотолюмінесцентних приладів, сонячних елементів.

Переваги вивчення дисципліни “Оптичні і фотоелектричні явища в напівпровідниках” полягають у тому, що отримані компетентності дадуть студентам основи свідомого освоєння нових теоретичних, технологічних, конструкційних та матеріалознавчих підходів щодо сучасної, зокрема мікромініатюрної опто-фотоелектроніки, що допоможе їм стати досвідченими спеціалістами в області мікро-та наносистемної техніки.

### **2. Мета навчальної дисципліни:**

Метою викладання навчальної дисципліни “Оптичні і фотоелектричні явища в напівпровідниках” є формування у студентів базових знань з фізичних основ, явищ і процесів, якими визначається взаємодія електромагнітного випромінювання з напівпровідниками і структурами на їх основі, а також знань оптичних і фотоелектричних властивостей, основних механізмів поглинання світла в напівпровідниках, процесів фотоіонізації та взаємодії фотозбуджених носіїв заряду з кристалічною ґраткою, фізичних явищ та напрямків їх застосування при розробці сучасних приладів опто-фотоелектроніки, оптимізації характеристик і параметрів оптичних та фоточутливих матеріалів і приладів.

**3. Пререквізити.** Засвоєння матеріалу даної дисципліни передбачає знання основ дисциплін “Квантова механіка”, “Фізичні основи електроніки”, “Фізика твердого тіла”.

#### **4. Результати навчання**

##### **знати:**

- фізичні закономірності і фізичні явища, що визначають взаємодію електромагнітного поля з речовиною напівпровідника, характеристики і параметри фоточутливих матеріалів та приладів опто- й фотоелектроніки;
- основні теоретичні моделі, що визначають сучасний науковий аналіз залежності властивостей напівпровідників від опромінення електромагнітним випромінюванням та основи вимірювання оптичних, фотоелектричних параметрів і характеристик напівпровідникових кристалів і структур;
- основи технології оптичних напівпровідникових матеріалів і приладів, виробництва та експлуатації оптичних і фотоелектричних приладів;

##### **вміти:**

- реалізовувати оптимізацію дії факторів (енергія фотонів, інтенсивність випромінювання, температура, електричні й магнітні поля), які впливають на ефективність роботи напівпровідникових оптичних і фотоелектричних приладів – відрізних фільтрів, імерсійних лінз, фотоприймачів, сенсорів, фотолюмінесцентних приладів, сонячних елементів;
- аналізувати і оптимізувати напівпровідникові матеріали і структури, фундаментальні властивості і характеристики оптичного випромінювання, критерії застосування оптичних і фотоелектричних явищ для забезпечення виконання завдань мікро-та наносистемної техніки;
- проводити вимірювання оптичних і фотоелектричних характеристик напівпровідників і визначати їх параметри.

#### **Програмні результати навчання**

**ПР 6.** Застосовувати навички планування та проведення експерименту для перевірки гіпотез та дослідження явищ мікро-та наноелектроніки, вміти використовувати стандартне обладнання, складати схеми пристроїв, аналізувати, моделювати та критично оцінювати отримані результати.

## 5. Опис навчальної дисципліни

### 5.1. Загальна інформація

Форма навчання	Рік підготовки	Семестр	Кількість		Кількість годин						Вид підсумкового контролю
			кредитів	годин	лекції	практичні	семінарські	лабораторні	самостійна робота	індивідуальні завдання	
Денна	3	5	3,0	90	30	-	-	15	45	-	екзамен

### 5.2. Дидактична карта навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
		л	пр	лаб	інд	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
<b>Модуль 1</b>						
<b>Змістовий модуль 1. Оптичні властивості напівпровідників</b>						
Тема 1. Вступ. Оптичні характеристики напівпровідників.	12	4	-	2	-	6
Тема 2. Основи фізики взаємодії випромінювання з напівпровідниками.	12	4	-	2	-	6
Тема 3. Поглинання випромінювання в напівпровідниках.	12	4	-	2	-	6
Тема 4. Явища світіння в напівпровідниках.	9	2	-	2	-	5
Разом за змістовим модулем 1	45	14	-	8	-	23
<b>Модуль 2</b>						
<b>Змістовий модуль 2. Фотоелектричні явища в напівпровідниках</b>						

Тема 5. Фотопровідність в напівпровідниках.	13	4	-	3	-	6
Тема 6. Кинетика процесів фотопровідності.	12	4	-	2	-	6
Тема 7. Рекомбінація нерівноважних носіїв заряду.	8	4	-	-	-	4
Тема 8. Механізми фото-е.р.с. в напівпровідниках.	12	4	-	2	-	6
Разом за змістовим модулем 2	45	16	-	7	-	22
<b>Усього годин</b>	90	30	-	15	-	45

### 5.2.1. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Лабораторна робота №1. Вивчення будови та градування ІЧ-спектрометра ИКС-21.	2
2	Лабораторна робота №2. Дослідження спектрів пропускання напівпровідникових кристалів CdSb та In <sub>4</sub> Se <sub>3</sub> .	2
3	Лабораторна робота №3. Вимірювання спектральних характеристик тонкоплівкових інтерференційно-абсорбційних фільтрів.	1
4	Лабораторна робота №4. Визначення показника заломлення за допомогою оптичного гоніометра.	2
5	Лабораторна робота №6. Вивчення будови та градування монохроматора УМ-2.	2
6	Лабораторна робота №7. Дослідження спектральної залежності фотопровідності напівпровідникового кристала.	2
7	Лабораторна робота №8. Дослідження спектральної залежності фотоерс напівпровідникової епітаксійної структури.	2
8	Лабораторна робота №9. Визначення показника заломлення і товщини напівпровідникової плівки за допомогою лазерного еліпсометра.	2

### 5.3. Зміст завдань для самостійної роботи

№	Назва теми	Кількість годин
1	<p><b>Тема 1. Вступ. Оптичні характеристики напівпровідників.</b> Вступ. Джерела неперервного спектра. Приймачи випромінювання. Спектр оптичного випромінювання. Еталони енергії випромінювання. Проходження ІЧ-випромінювання крізь атмосферу. Спектр поглинання світла.</p>	6
2	<p><b>Тема 2. Основи фізики взаємодії випромінювання з напівпровідниками.</b> Поглинання і випромінювання світла різними напівпровідниками. Непоглинаюче середовище. Слабке поглинання хвилі достатньо великої частоти. Дисперсійні співвідношення Крамерса-Кроніга. Методи вимірювання оптичних характеристик напівпровідників Комбінована густина станів. Циклотронний резонанс, ефект обертання Фарадея.</p>	6
3	<p><b>Тема 3. Поглинання випромінювання в напівпровідниках.</b> Оптичні елементи ІЧ-техніки. Переходи домішка-зона. Структура енергетичних зон напівпровідників. Поглинання і відбивання хвиль газом вільних носіїв заряду. Коефіцієнти поглинання і випромінювання при оптичних переходах зона – зона. Напівпровідникові лазери. Критичні точки. Непрямі міжзонні переходи в невідродженому Ge і Si. Переходи із глибоких зон. Міжзонні оптичні переходи в сильнолегованих напівпровідниках. Спектри поглинання сильнолегованих напівпровідників.</p>	6
4	<p><b>Тема 4. Явища світіння в напівпровідниках.</b> Спін-орбітальне розщеплення енергетичних зон. Правило суми сил осцилятора. Віртуальні переходи. Ефекти згасання. Плазмові ефекти. Поляритони. Електрооптичні ефекти. Електропоглинання і електровідбивання. Модуляційна спектроскопія. Магнітооптика: магнітоплазмові ефекти; міжзонні переходи в квантуючому магнітному полі. Експериментальні результати вивчення поглинання в різних областях спектра. Тонка структура спектрів.</p>	5
5	<p><b>Тема 5. Фотопровідність в напівпровідниках.</b> Частотна залежність фотопровідності. Модуляція світла. Вплив рівнів прилипання при монополярній провідності і біполярній провідності в напівпровіднику. Методи вимірювання стаціонарної фотопровідності. Методи із постійним та модульованим освітленням.</p>	6
6	<p><b>Тема 6. Кинетика процесів фотопровідності.</b> Обчислення фотопровідності: режим постійного струму; режим постійного поля; режим максимальної чутливості; випадок малої відносної</p>	6

	чутливості. Поріг чутливості. Виключення впливу контактів. Виключення впливу неоднорідності освітлення.	
7	<b>Тема 7. Рекомбінація нерівноважних носіїв заряду.</b> Фотопровідність при наявності поверхневої рекомбінації і дифузії носіїв заряду. Вплив поверхневої рекомбінації на об'ємні властивості напівпровідників.	4
8	<b>Тема 8. Механізми фото-е.р.с. в напівпровідниках.</b> Сучасні фотоприймачі і граничні значення їх характеристик. Шуми фотоприймачів. Прилади виявлення і спостереження. Оптична фільтрація і модуляція. Растри. Застосування інфрачервоної техніки в промисловості і наукових дослідженнях. Основні характеристики електронно-діркових фотоелементів. Вольт-амперна характеристика фотоприймача. Люкс-амперна характеристика. Спектральний розподіл фоточутливості. Температурна залежність темного струму, фотоструму і фотое.р.с. Експериментальна перевірка співвідношення для вентильної фотое.р.с. Фотое.р.с. в області домішкового збудження.	6

## 6. Система контролю та оцінювання

### Види та форми контролю

Формами поточного контролю є усна чи письмова (тестування, реферат, лабораторна робота) відповідь студента, модульна контрольна робота та ін.

Формами підсумкового контролю є екзамен.

### Засоби оцінювання

Засобами оцінювання та демонстрування результатів навчання можуть бути:

- контрольні роботи;
- стандартизовані тести;
- реферати;
- презентації результатів виконаних завдань та досліджень;
- студентські презентації та виступи на наукових заходах;
- завдання на лабораторному обладнанні,
- інші види індивідуальних та групових завдань.

## Критерії оцінювання результатів навчання з навчальної дисципліни

Критерієм успішного проходження здобувачем освіти підсумкового оцінювання може бути досягнення ним мінімальних порогових рівнів оцінок за кожним запланованим результатом навчання навчальної дисципліни.

Знання студентів на екзамені оцінюється як з теоретичної, так і з практичної підготовки. Критерії оцінювання навчальних досягнень студентів за шкалою ECTS та національною шкалою на екзамені з дисципліни “ Оптичні і фотоелектричні явища в напівпровідниках ”:

Студент має відповісти на три питання до дисципліни “ Оптичні і фотоелектричні явища в напівпровідниках ”, які поставлені у відповідному білеті. За відповідь на перше і друге питання у білеті студент може максимально одержати по 13 балів, на третє питання –

14 балів, результати цих відповідей додаються. Результати іспиту оцінюються відповідно до прийнятої уніфікованої університетської шкали - 40 балів від загальної 100-бальної, при цьому по окремих питаннях білета виставляється:

0–2 балів. Студент виявляє слабке уявлення про суть оптичних і фотоелектричних явищ в напівпровідниках.

3-5 балів. Студент має фрагментарні уявлення з предмету вивчення і може відтворити окремі його частини. Знає основні закономірності оптичних і фотоелектричних явищ в напівпровідниках, але не розуміє їх призначення.

6-7 балів. Студент невпевнено знає окремі розділи, означення, факти, що стосуються оптичних і фотоелектричних явищ в напівпровідниках, неповно розуміє конструкцію та функціонування оптичних елементів і систем.

8-9 балів. Студент за допомогою викладача відтворює основні частини навчального теоретичного матеріалу, дає визначення основних понять і формулює окремі закони й закономірності, що розглядалися в курсі.

10-11 балів. Студент самостійно відтворює значну частину навчального матеріалу, формулює закони й закономірності, що розглядалися в курсі, але допускає несуттєві помилки. Може пояснити процеси або явища, які стосуються принципів оптичних і фотоелектричних явищ в напівпровідниках.

11-12 балів. Студент самостійно відтворює практичний і теоретичний навчальний матеріал, пояснює суть фізичних основ оптичних і фотоелектричних явищ в напівпровідниках, узагальнює їх, але допускає неточності.

12-14 балів. Студент вільно володіє засвоєними знаннями і використовує їх у нестандартних ситуаціях, самостійно оцінює суть оптичних і фотоелектричних явищ і процесів, встановлює зв'язки між різними розділами, має системні знання з предмета, аргументовано використовує їх, у тому числі в проблемних ситуаціях; самостійно знаходить і використовує інформацію згідно з поставленим завданням; аналізує додаткову інформацію.

У відомість обліку успішності та залікову книжку (індивідуальний навчальний план) студента заноситься сумарна кількість балів поточного (0-60 балів) та підсумкового контролю (екзамен; 0-40 балів) згідно такої таблиці:

### Шкала оцінювання: національна та ЄКТС

Оцінка за національною шкалою	Оцінка за шкалою ECTS	
	Оцінка (бали)	Пояснення за розширеною шкалою
Відмінно	A (90-100)	відмінно
Добре	B (80-89)	дуже добре
	C (70-79)	добре
Задовільно	D (60-69)	задовільно
	E (50-59)	достатньо



<b>Незадовільно</b>	FX (35-49)	(незадовільно) з можливістю повторного складання
	F (1-34)	(незадовільно) з обов'язковим повторним курсом

### Розподіл балів, які отримують студенти

Поточне оцінювання (аудиторна та самостійна робота) T1, T2 ... T10 – теми змістових модулів											Екзамен (Кількість балів)	Сума- рна к-ть балів	
Змістовий модуль 1						Змістовий модуль 2						40	100
T1	T2	T3	T4	-	-	T5	T6	T7	T8	-	-		
6	8	8	8	-	-	8	8	6	8	-	-		

## 7. Рекомендована література

### Методичні та наукові роботи автора

1. **Стребежев В.М.** Дисертація канд. фіз.-мат.наук “ Фоточутливі елементи і тонкоплівкові інтерференційні фільтри на базі CdSb та In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> ”, спеціальність 01.04.01 – Фізика приладів, елементів і систем. Захищена 15.03.2002р. в Інституті термоелектрики, м. Чернівці.
2. **V.M. Strebezhev**, I.M. Yuriychuk, P.M. Fochuk, V.V. Strebezhev, V.G. Pylypko, M.O. Sorokatyi. Ellipsometric studies and scanning electron microscopy of Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te films and layers modified by laser irradiation // Proc. SPIE. – 2020. – V.11369. – P. 1E-1 – 1E-8. IF (Scopus) =0,45, SNIP= 0,39.  
[https://drive.google.com/file/d/1pRXYAawZWKUdk\\_F1VhbkQQNe41jxvx\\_o/view](https://drive.google.com/file/d/1pRXYAawZWKUdk_F1VhbkQQNe41jxvx_o/view)
3. **V. M. Strebezhev** Application of infrared semiconductors interference filters for optical sensors in express spectroscopy of organic materials/ V.V. Strebezhev, G.Vorobets, R. Hurjui, R.Rogov, Strebezhev V.V. Food and Environment Safety//Journal of Faculty of Food Engineering.– Ștefan cel Mare University. Suceava, Vol. XIV, Iss.1, 2015.– p. 93-100.

4. Стребезев В.В. Властивості оптичних і фотоелектричних елементів на основі кристалів  $\text{In}_4\text{Se}_3$ ,  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_{3x}$  / В.В. Стребезев, **В.М. Стребезев**, С.В. Нічий, І.М. Юрійчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Том 66, Вып. 6/12. – С. 113 - 116.
5. Ю.К. Обедзинський, Б.М. Грицюк, В.В. Стребезев, **В.М. Стребезев**, І.М. Юрійчук. Фоточутливі гетероструктури і фільтри інфрачервоного діапазону на монокристалах  $\text{CdSb}$ ,  $\text{In}_4\text{Se}_3$ // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. –6/12(60) . – С.44-46.
6. Патент на корисну модель № 50924, Україна, UA, МПК (2009), С30В 13/00; С30В 29/10; С30В 31/00. Спосіб виготовлення фоточутливої гетероструктури на основі  $\text{In}_4\text{Se}_3$ // Винахідники: Воробець Г.І., Мельничук Т.А., **Стребезев В.М.**, Власник: Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. – заявка у 2009 13943; заявл. 30.12.2009; публ. 25.06.2010. Бюл.№12.

### Основна

1. Павлов С. М. Основи мікроелектроніки : навч. посібник / С. М. Павлов ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2010. - 224 с.
2. Шалімова К.В. Фізика напівпровідників. М. 1985р. – 392с.
3. Основи метрології фотоприймачів видимого, ультрафіолетового та інфрачервоного діапазонів: навч. посібник / В.М. Годованюк, В.К. Бутенко, І.В. Докторович, В.Г. Юр'єв; [за ред. В.М. Годованюка]. – Чернівці: ЧНУ, 2014. – 440с.
4. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники.- М: Выс.шк., 2005.- 543 с.
5. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников.- М: Наука, 1977.-366 с.
6. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках.- М: Мир, 1973.- 456 с.
7. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел.- М: Изд-во иностр. лит., 1962.- 560 с.
8. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.- М: Физматгиз, 1963.- 494 с.
9. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.:Мир, 1972. – 534 с.
10. Сердюк В.В., Черемисюк Г.Г., Фотоэлектрические явления в полупроводниках.- К.: Либідь, 1993.- 192 с.
11. Смит Р. Полупроводники.- Изд. 2-е. М: Мир, 1982.- 560 с.
12. Беляева А.И., Сиренко В.А. Криогенные многослойные покрытия. – К.:Наукова думка, 1991. – 276 с.

### Допоміжна

13. Мосс.Т., Баррел Г.,Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника.- М: Мир, 1976.-431с.

14. А.А. Щука. Электроника. Учебное пособие. СПб, БХВ-Петербург, 2006, 800с.
15. Тауц Я. Оптические свойства полупроводников в видимой и ультрафиолетовой части спектра. - М: Мир, 1967.- 75с.
16. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М: Наука, 1978.- 616с.
17. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / Под ред. В.И.Стафеева – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
18. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники.- М: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1988.-192 с.

### **Інформаційні ресурси**

1. <http://e-learning.chnu.edu.ua/> - Сайт дистанційної освіти ЧНУ.
  2. [http://posibnyky.vntu.edu.ua/mikro\\_el/81.htm](http://posibnyky.vntu.edu.ua/mikro_el/81.htm)
- Павлов С. М. Основи мікроелектроніки : навч. посібник. – Вінниця - 2010.
3. [https://stud.com.ua/83160/tovarovnavstvo/optichni\\_yavischa\\_napivprovidnikah](https://stud.com.ua/83160/tovarovnavstvo/optichni_yavischa_napivprovidnikah)
  4. [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/32034/1/Kvantova\\_elektonika.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/32034/1/Kvantova_elektonika.pdf)
- О.С. Кривець, О.О. Шматько, О.В. Ющенко. Квантова електроніка  
Навчальний посібник. Суми. 2013.