

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет

Кафедра оптики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Оптична діагностика напівпровідників/
Optical diagnostics of semiconductors

для студентів

галузь знань **15 Автоматизація та приладобудування**
спеціальність **152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка**
освітній рівень **магістр**
освітня програма **Лазерна і оптоелектронна техніка**
спеціалізація _____
(за наявності) (назва спеціалізації)
вид дисципліни **обов'язкова**

Форма навчання	денна
Навчальний рік	2022/2023
Семестр	4
Кількість кредитів ECTS	6
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Форма заключного контролю	іспит

Викладачі: проф. Кондратенко С.В.

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

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

Розробник(и): Кондратенко С.В., д.ф.-м.н., професор, професор кафедри оптики

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри _____ Поперенко Л.В.

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Протокол № 13 від « 19 » травня 2022 р.

Схвалено науково - методичною комісією фізичного факультету _____

Протокол від « 10 » червня 2022 року № 11

Голова науково-методичної комісії _____ (Оліх О.Я.)
(підпис) (прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 2022 року

ВСТУП

1. Мета дисципліни – надати базові знання з оптики напівпровідників та твердотільних наноструктур, які необхідні для діагностики напівпровідникових матеріалів та розуміння явищ, що вивчаються в інших курсах за спеціальністю.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати основи квантової механіки, основні поняття фізики напівпровідників, принципи теорії твердого тіла.
2. Вміти користуватися методами фізики напівпровідників, оптики, квантової механіки, експериментальними та теоретичними методами досліджень фізичних властивостей металів, діелектриків та напівпровідників.
3. Володіти елементарними навичками дослідження оптичних властивостей твердих тіл.

3. Анотація навчальної дисципліни:

Навчальна дисципліна «Оптична діагностика напівпровідників» присвячена вивченню оптичних властивостей напівпровідників та фізичних процесів, покладених в основу методів оптичної діагностики. Розглянуто електронний спектр, поглинання та випромінювання світла напівпровідниками. Вивчення дисципліни передбачає також ознайомлення з новітніми методиками діагностики наноструктур та керування оптичними властивостями напівпровідникових матеріалів.

Програма навчальної дисципліни складається з таких змістових модулів:

1. У межах першого змістовного модуля на лекціях розглядаються поглинання та випромінювання світла напівпровідниками та напівпровідниковими наноструктурами, фононні процеси в напівпровідниках, проводиться також самостійне вивчення матеріалу описового характеру, вказаного лектором.

2. У межах другого змістовного модуля на лекціях розглядаються оптичні методи діагностики та аналізу напівпровідників, зокрема спектроскопія відбивання, поглинання та фотолюмінесценції, комбінаційне розсіювання світла, спектральна еліпсометрія, фотоелектронна спектроскопія, кінетичні методи діагностики напівпровідників. Передбачено самостійне вивчення матеріалу описового характеру, вказаного лектором.

4. Завдання (навчальні цілі): - ознайомлення студентів з основними методами оптичної діагностики напівпровідників, напрацювання вміння пояснити якісно та математично описати оптичні процеси в напівпровідниках та напівпровідникових структурах різної топології, і на основі отриманих співвідношень експериментально визначати їх параметри.

5. Результати навчання за дисципліною:

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання (за необхідності)	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	Основні оптичні властивості напівпровідників та напівпровідникових структур різної топології.	Лекції та лабораторні	Щотижневий контроль попереднього матеріалу шляхом відповідей на конкретну кількість питань, модульна контрольна робота	20

1.2	Фізичні принципи оптичної діагностики напівпровідників методами спектроскопії відбивання, поглинання та фотолюмінесценції, комбінаційного розсіювання світла, конфокальної і ближньопольової оптичної мікроскопії, спектральної еліпсометрії, фотоелектронна спектроскопії.	Лекції та лабораторні	Щотижневий контроль попереднього матеріалу шляхом відповідей на конкретну кількість питань,	20
2.1	Використовувати отримані знання для аналітичних розрахунків та комп'ютерного моделювання електронних властивостей пристроїв твердотільної електроніки та оптотехніки.			20
2.2	Використовувати результати аналітичних розрахунків та комп'ютерного моделювання для отримання інформації про фізичні механізми явищ, що впливають на пристроїв твердотільної електроніки та оптотехніки, вміти проводити відповідні виміри та розрахунки.	Лекції та лабораторні	Щотижневий контроль попереднього матеріалу шляхом відповідей на конкретну кількість питань, модульна контрольна робота	20
2.3	Використати набуті навички на виробничих підприємствах та в лабораторіях науково-дослідних і навчальних установ.	Лекції та лабораторні	Щотижневий контроль попереднього матеріалу шляхом відповідей на конкретну кількість питань,	20

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання

Програмні результати навчання	1	2
PR1. Знати і розуміти сучасні методи наукових досліджень, організації та планування експерименту, комп'ютеризованих методів дослідження та опрацювання результатів вимірювань.	+	+
PR19. Вміти здійснювати планування та проводити експериментальне дослідження структурних, оптичних та електрофізичних властивостей органічних (в тім числі біологічних та наноб'єктів) і неорганічних середовищ.	+	+
PR20. Проводити проектування та конструювання оптичних та оптико-електронних приладів та систем, приладів для спектральних досліджень.		

7. Схема формування оцінки.

7.1 Форми оцінювання студентів:

- семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1 (10 балів).
2. Модульна контрольна робота 2 (10 балів).
2. Звіти про виконані лабораторні роботи (20 балів).
3. Реферат (5).
4. Опитування в процесі лекції (5 балів).
5. Самостійна робота (10 балів).

– **підсумкове оцінювання у формі екзамену:** на екзамені максимально можна отримати 40 балів.

- умови допуску до підсумкового екзамену:

Студент не допускається до екзамену, якщо під час семестру набрав менше ніж 20 балів.

7.2 Організація оцінювання:

Контроль здійснюється за модульно-рейтинговою системою, яка складається із 2 змістових модулів. Система оцінювання знань включає поточний, модульний та семестровий контроль знань. Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за 100-бальною шкалою. Форми поточного контролю: оцінювання контрольних робіт, звітів з лабораторних робіт, реферату, усних відповідей під час лекції, письмових та усних самостійних завдань. Студент може отримати максимально **20** балів за оцінювання реферату, усних відповідей під час лекції, письмових та усних самостійних завдань та **20** балів за звіти про виконані лабораторні роботи. Модульний контроль: 2 модульні контрольні роботи, за які студент може отримати максимально **20 балів** (по **10 балів** за кожну роботу). Підсумковий семестровий контроль проводиться у формі іспиту, під час якого студент може отримати максимально **60** балів.

7.3 Шкала відповідності оцінок

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

8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекцій і лабораторних занять

№ п/п	Номер і назва теми*	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
<i>Змістовий модуль 1</i>				
1	<p>Лекція 1. Вступ. Огляд методів оптичної діагностики напівпровідників.</p> <p>Lecture 1. Introduction. Review of methods of optical diagnostics of semiconductors.</p>	2	2	3
2	<p>Лекція 2. Оптичне поглинання в квантових ямах. Особливості поглинання світла напівпровідниковими наноструктурами. Міжзонні та міжпідзонні оптичні переходи в квантових ямах. Оптичне поглинання квантовими точками та квантовими нитками. Вплив розмірного квантування і хімічного складу на оптичні властивості напівпровідникових матеріалів.</p> <p>Lecture 2. Optical absorption in quantum wells. Features of light absorption by semiconductor nanostructures. Interband and intersubband optical transitions in quantum wells. Optical absorption by quantum dots and quantum filaments. Influence of dimensional quantization and chemical composition on optical properties of semiconductor materials.</p>	2	2	3
3	<p>Лекція 3. Фотолюмінесценція в квантових ямах і квантових дротах. Випромінювальна рекомбінація в квантових ямах і квантових дротах. Форма смуги фотолюмінесценції. Фотолюмінесценція напівпровідникових наноструктур при різних температурах. Температурне та оптичне гасіння фотолюмінесценції. Перетворення інфрачервоного випромінювання у видимий діапазон при двофотонному поглинанні (Two-photon upconversion).</p> <p>Lecture 3. Photoluminescence in quantum wells and quantum wires. Radiation recombination in quantum wells and quantum wires. Photoluminescence band shape. Photoluminescence of semiconductor nanostructures at different temperatures. Temperature and optical quenching of photoluminescence. Conversion of infrared radiation into the visible range with two-photon upconversion.</p>	2		3
4	<p>Лекція 4. Екситони в напівпровідниках та наноструктурах. Екситони Ваньє-Мотта та Френкеля. Енергетичний спектр та стани екситонів Ваньє-Мотта. Енергії зв'язку екситонів в типових напівпровідниках. Екситонне поглинання світла в напівпровідниках. Вплив екситонних ефектів на оптичні явища поблизу краю забороненої зони. Екситонне поглинання при прямих переходах у випадку екситонів Ваньє-Мотта. Поглинання</p>	2	2	3

	<p>при непрямих переходах. Екситонне поглинання в квантових ямах. Аналіз експериментів.</p> <p>Lecture 4. Excitons in semiconductors and nanostructures. Vanier-Mott and Frenkel excitons. Energy spectrum and states of Vanier-Mott excitons. Exciton binding energies in typical semiconductors. Exciton light absorption in semiconductors. Influence of exciton effects on optical phenomena near the edge of the band gap. Exciton absorption at direct transitions in the case of Vanier-Mott excitons. Absorption at indirect transitions. Exciton absorption in quantum wells. Analysis of experiments.</p>			
5	<p>Лекція 5. Електрооптичні та оптичні ефекти в квантових ямах та надгратках. Електронний спектр надграток. Сходінки Штарка та осциляції Блоха. Електрооптичні модулятори.</p> <p>Lecture 5. Electro-optical and optical effects in quantum wells and superlattices. Electronic spectrum of superlattices. Stark steps and flea oscillations. Electro-optical modulators.</p>	2		3
6	<p>Лекція 6. Поглинання світла вільними носіями заряду. Оптичні явища, обумовлені вільними носіями заряду. Класичний плазмонний резонанс, плазмова частота, час релаксації. Спектри відбивання вільними носіями заряду, аналіз експериментальних даних.</p> <p>Поглинання світла вільними носіями заряду. Переріз поглинання, вплив різних механізмів розсіювання. Внутрішньозонні оптичні переходи між різними гілками зони провідності та валентної зони напівпровідників та напівпровідникових наноструктур.</p> <p>Lecture 6. Absorption of light by free charge carriers. Optical phenomena caused by free charge carriers. Classical plasmon resonance, plasma frequency, relaxation time. Reflection spectra of free charge carriers, analysis of experimental data.</p> <p>Absorption of light by free charge carriers. Absorption cross section, influence of different scattering mechanisms. Intraband optical transitions between different branches of the conduction band and the valence band of semiconductors and semiconductor nanostructures.</p>	2	2	3
7	<p>Лекція 7. Теплові коливання атомів кристалу. Коливання і хвилі в одновимірній решітці з однакових атомів. Перша зона Бріллюєна. Періодичні граничні умови. Оптичні коливання. Коливання тривимірної кристалічної решітки. Дисперсійні криві та частотний спектр коливань решітки. Енергія нормальних коливань. Фонони в полярних напівпровідниках. Криві дисперсії для фононів в кубічних кристалах.</p>	2		3

	<p>Lecture 7. Thermal oscillations of crystal atoms. Oscillations and waves in a one-dimensional lattice of identical atoms. The first zone of Brillouin. Periodic boundary conditions. Optical oscillations. Oscillations of a three-dimensional crystal lattice. Dispersion curves and frequency spectrum of lattice oscillations. Energy of normal oscillations. Phonons in polar semiconductors. Dispersion curves for phonons in cubic crystals.</p>			
8	<p>Лекція 8. Фонони в об'ємних напівпровідниках. Закон дисперсії та частотний спектр коливань тривимірної кристалічної решітки. Енергія нормальних коливань. Фонони. Функція густини мод коливань. Локальні фононні коливання.</p> <p>Lecture 8. Phonons in bulk semiconductors. Dispersion law and frequency spectrum of oscillations of a three-dimensional crystal lattice. Energy of normal oscillations. Phonons. Function of density of oscillation modes. Local phonon oscillations.</p>	2	2	3
9	<p>Лекція 9. Поглинання решіткою. Спектри інфрачервоного відбивання напівпровідників. Поглинання решіткою. Багатофононне поглинання. Фононні поляритони. Плазмон-фононний резонанс. Спектри поглинання і відбивання для однофононних переходів, аналіз експериментальних даних.</p> <p>Lecture 9. Absorption by a lattice. Infrared reflection spectra of semiconductors. Absorption lattice. Multiphone absorption. Phonon polaritons. Plasmon-phonon resonance. Absorption and reflection spectra for single-phonon transitions, analysis of experimental data.</p>	2		3
10	<p>Лекція 10. Дисперсійні залежності фононів в надгратках. Особливості фононного спектра в низько-розмірних системах. Дисперсійні залежності фононів в напівпровідникових надгратках. Згортка гілок акустичних фононів.</p> <p>Lecture 10. Dispersion dependences of phonons in superlattices. Features of the phonon spectrum in low-dimensional systems. Dispersion dependences of phonons in semiconductor superlattices. Convolution of branches of acoustic phonons.</p>		2	3
11	<p>Лекція 11. Локалізація фононів в надгратках. Інтерфейсні оптичні моди. Комбінаційне розсіювання світла в надгратках.</p> <p>Lecture 11. Localization of phonons in superlattices. Interface optical modes. Combinational light scattering in lattices.</p>		2	3
12	<p>Лекція 12. Фонони в нанокристалах. Модель пружного континуума. Оптичні моди в обмежених структурах. Лембівська мода. Коливальні спектри нанокристалів. Акустичні фонони в квантових дротах та квантових точках.</p>		2	3

	Lecture 12. Phonons in nanocrystals. Elastic continuum model. Optical modes in limited structures. Lamb fashion. Oscillatory spectra of nanocrystals. Acoustic phonons in quantum wires and quantum dots.			
--	--	--	--	--

Змістовий модуль 2

13	<p>Лекція 13. Комбінована функція густини станів та сингулярності Ван Хова. Мікроскопічна теорія діелектричної функції. Комбінована функція густини станів та сингулярності Ван Хова. Критичні точки. Прямий та непрямий край поглинання. Частотно-модульоване відбивання та поглинання.</p> <p>Lecture 13. Joined density of state and Van How singularity. Microscopic theory of dielectric function. Combined function of state density and Van How singularity. Critical points. Direct and indirect absorption edge. Frequency-modulated reflection and absorption.</p>	2	2	3
14	<p>Лекція 14. Основи модуляційної спектроскопії. Напівпровідники в однорідному електричному полі. Електровідбивання. Фотовідбивання. Вплив деформацій на електронний спектр напівпровідників. П'єзовідбивання.</p> <p>Lecture 14. Fundamentals of modulation spectroscopy. Semiconductors in a homogeneous electric field. Electroreflection. Photo reflection. The deformation flow is not the electronic spectrum of semiconductors. Piezo reflection.</p>	2	2	3
15	<p>Лекція 15. Спектральна еліпсометрія. Методики визначення спектральних залежностей показників заломлення та поглинання тонких плівок.</p> <p>Lecture 15. Spectral ellipsometry. Methods for determining the spectral dependences of refractive indices and absorption of thin films.</p>	2	2	3
16	<p>Лекція 16. Випромінювання світла наноструктурами. Випромінювальна рекомбінація в квантових ямах. Фотолюмінесценція в квантових ямах, точках, нитках. Електролюмінесценція в напівпровідникових структурах. Оптичне підсилення в діодах з гетеропереходами. Світлодіоди та лазери на подвійних гетероструктурах.</p> <p>Lecture 16. Radiation of light by nanostructures. Radiation recombination in quantum wells. Photoluminescence in quantum wells, points, threads. Electroluminescence in semiconductor structures. Optical amplification in diodes with heterojunctions. LEDs and lasers on double heterostructures.</p>	2		3

17	<p>Лекція 17. Оптична мікроскопія наноструктур. Оцінка граничної величини роздільної здатності оптичного мікроскопу. Близько-польова оптична мікроскопія. Конфокальний мікроскоп. Особливості конфокальної мікроскопії. Фотолюмінесценція наноструктур.</p> <p>Lecture 17. Optical microscopy of nanostructures. Estimation of the limiting value of the resolution of an optical microscope. Near-field optical microscopy. Confocal microscope. Features of confocal microscopy. Photoluminescence of nanostructures.</p>	2	2	4
18	<p>Лекція 18. Розсіювання світла коливаннями решітки. Розсіювання світла коливаннями решітки. Комбінаційне розсіювання на оптичних фонах. Розсіювання на акустичних фонах (Мандельштама-Бріллюєна).</p> <p>Lecture 18. Light scattering by lattice oscillations. Light scattering by lattice oscillations. Raman scattering on optical phonons. Scattering on acoustic phonons (Mandelstam-Brillouin).</p>	2		4
19	<p>Лекція 19. Кінетичні методи оптичної діагностики напівпровідників. Кінетика фотопровідності та фотолюмінесценції. Кінетика загасання фотопровідності та зонно-зонної люмінесценції. Лінійна та квадратична рекомбінація. Рекомбінація Шоклі-Ріда.</p> <p>Lecture 19. Kinetic methods of optical diagnostics of semiconductors. Kinetics of photoconductivity and photoluminescence. Kinetics of photoconductivity attenuation and band-band luminescence. Linear and quadratic recombination. Shockley-Reed recombination.</p>	2	2	3
20	<p>Лекція 20. Термостимульована провідність та фотолюмінесценція. Класифікація центрів рекомбінації в напівпровідниках. Центри прилипання. Діагностика рівнів прилипання та рекомбінації методами термостимульованої провідності та фотолюмінесценції.</p> <p>Lecture 20. Thermostimulated conductivity and photoluminescence. Classification of recombination centers in semiconductors. Centers of adhesion. Diagnosis of levels of adhesion and recombination by methods of thermally stimulated conductivity and photoluminescence.</p>	2	2	3
21	<p>Лекція 21. Інфрачервоне гасіння провідності та фотолюмінесценції. Оптична діагностика параметрів центрів рекомбінації. Вплив інфрачервоного випромінювання на провідність та люмінесценцію напівпровідників та напівпровідникових наноструктур.</p>	2	2	3

	Lecture 21. Infrared quenching of conductivity and photoluminescence. Optical diagnostics of recombination center parameters. Influence of infrared radiation on the conductivity and luminescence of semiconductors and semiconductor nanostructures.			
ВСЬОГО		42	18	60

Загальний обсяг 135 год. в тому числі:

Лекцій – **42 год.**

Лабораторні заняття - **28 год.**

Самостійна робота - **65 год.**

9. Рекомендовані джерела:

Основна:

1. С.В. Кондратенко. Фізика напівпровідників. – Київ, ТОВ Інсервіс, 2014. – 240 с.
2. Ангельський О.В., Фельде Х.В., Городинська Н.В., Фесів І.В Конспект лекцій для самостійної роботи з навчальної дисципліни «Тенденції розвитку оптичної метрології» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка». – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2021. – 97 с.
3. Born, M. & Wolf, E. (1999). Principles of Optics, (7), (expanded), Cambridge U. Press, Cambridge
4. Klingshirn, C. F. (2012). Semiconductor optics. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29557-4>
5. Inamuddin, Mohd Imran Ahamed, Rajender Boddula, and Tariq Altalhi (Eds.). (2021). Optical Properties and Applications of Semiconductors. CRC Press.

Додаткова:

1. Ferraro, J. R. (2003). Introductory Raman spectroscopy. Academic Press.
2. Аналітичні методи досліджень. Спектроскопічні методи аналізу: теоретичні основи і методики: навчальний посібник для підготовки студентів вищих навчальних закладів / Д.О. Мельничук, С.Д. Мельничук, В.М. Войціцький та ін.: за ред. акад. Д.О. Мельничука. – К.: ЦП «Компринт», 2016. – 289 с.
3. Rosencher, E., & Vinter, B. (2002). Optoelectronics. Cambridge University Press.
4. Griffiths, D. J. (2018). Introduction to quantum mechanics (3rd ed.). Springer.
5. Parson, W. W. (Ed.). (2005). Modern Optical Spectroscopy. Springer