

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Кафедра фізичної оптики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Декан фізичного факультету

_____ Руслан БОБК
«19» _____ 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Нелінійна оптика

Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Галузь знань	10 – природничі науки
Спеціальність	104 – фізика та астрономія
Освітня програма	фізика
Спеціалізація	
Вид дисципліни	за вибором
Факультет	фізичний

2025 / 2026 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету.

Протокол від 29.08.2025 р. № 10.

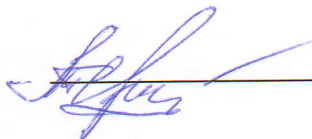
РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Маковецький Євген Дмитрович, канд. фіз.-мат. наук, доцент каф. фізичної оптики

Програму схвалено на засіданні кафедри фізичної оптики.

Протокол від 27.08.2025 р. № 1.

В. о. завідувача кафедри фізичної оптики



Сергій ТАРАПОВ

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми «Фізика».

Гарант освітньо-професійної програми

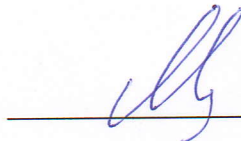


Олег ЛАЗОРЕНКО

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету.

Протокол від 28.08.2025 р. № 5.

Голова методичної комісії



Микола МАКАРОВСЬКИЙ

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Нелінійна оптика» складена відповідно до освітньої програми підготовки «бакалавр» зі спеціальності «104 – фізика та астрономія», освітньо-професійна програма «Фізика».

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни – оволодіти основоположними уявленнями про нелінійні оптичні властивості різноманітних середовищ, про експериментальні дослідження та про теорії нелінійної оптики.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни – вивчити матеріал щодо нелінійних оптичних властивостей різноманітних середовищ в рамках робочої програми даного курсу та додаткового матеріалу, який рекомендовано вивчити самостійно.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується складністю та невизначеністю умов (ІК 1).
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК 2).
- Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК 3).
- Здатність приймати обґрунтовані рішення (ЗК 5).
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт (ЗК 8).
- Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків (ЗК 9).
- Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово (ЗК 12).
- Здатність спілкуватися іноземною мовою (ЗК 13).
- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії (ФК 1).
- Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту (ФК 7).
- Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації (ФК 9).
- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей (ФК 10).
- Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень (ФК 12).
- Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук (ФК 13).
- Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту (ФК 14).

1.3. Кількість кредитів – 3.

1.4. Загальна кількість годин – 90.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Нормативна / за вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
4-й	
Семестр	
7-й	
Лекції	
32 год.	
Практичні, семінарські заняття	
не передбачено навчальним планом	
Лабораторні заняття	
не передбачено навчальним планом	
Самостійна робота	
58 год.	
в тому числі індивідуальні завдання	
курсова робота: 20 год.	

1.6. Заплановані результати навчання

У результаті вивчення даного курсу студент повинен

знати: основні теоретичні положення для опису оптичних властивостей нелінійних оптичних середовищ з нелінійною поляризацією, квадратичною або кубічною по електричному полю, що діє на середовище, а також властивості інших нелінійно-оптичних середовищ; головні відомі експериментальні результати досліджень оптичних властивостей таких середовищ..

вміти: застосовувати здобуті знання для одержання, аналізу та пояснення експериментальних даних при дослідженнях нелінійних оптичних середовищ.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні 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/або астрономії (ПРН 1).
- Знати і розуміти фізичні основи астрономічних явищ: аналізувати, тлумачити, пояснювати і класифікувати будову та еволюцію астрономічних об'єктів Всесвіту (планет, зір, планетних систем, галактик тощо), а також основні фізичні процеси, які відбуваються в них (ПРН 2).
- Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій (ПРН 3).
- Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії (ПРН 5).
- Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії (ПРН 6).

- Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації (ПРН 7).
- 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 (ПРН 8).
- Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки (ПРН 11).
- Розуміти зв'язок фізики та/або 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 (ПРН 13).
- 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 (ПРН 17).
- Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства (ПРН 22).
- Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії (ПРН 23).
- Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу та суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій (ПРН 24).
- Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітньої траєкторії та професійного розвитку (ПРН 25).

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Основні рівняння нелінійної оптики, квадратична поляризація середовища та пов'язані з нею ефекти

- Тема 1.* Вступ. Предмет та задачі нелінійної оптики. Нелінійна оптика як розділ загальної проблеми взаємодії випромінювання з речовиною. Теоретичні основи нелінійної оптики: нелінійна поляризація та її властивості; хвильове рівняння для нелінійного середовища.
- Тема 2.* Квадратична поляризація середовища. Тензор коефіцієнтів квадратичної поляризації та його властивості. Розповсюдження хвиль у середовищах із квадратичною поляризацією. Трихвильова взаємодія. Рівняння пов'язаних хвиль.
- Тема 3.* Генерація другої гармоніки у кристалах. Основні рівняння, їх розв'язання у наближенні заданого поля. Дослід Франкена. Довжина когерентності та фазовий синхронізм.
- Тема 4.* Способи виконання умови фазового синхронізму та вибір кристалів для спостереження другої гармоніки. Випрямлення світла у середовищах із квадратичною поляризацією.
- Тема 5.* Параметричні нелінійні ефекти у середовищах із квадратичною поляризацією. Параметричне підсилення світла. Співвідношення Менлі–Роу.
- Тема 6.* Параметрична генерація вимушеного випромінювання. Параметричне перетворення частоти вгору.
- Тема 7.* Параметрична люмінесценція. Лінійний електрооптичний ефект. Модулятори світла.

Розділ 2. Кубічна поляризація середовища та пов'язані з нею ефекти

- Тема 1.* Кубічна поляризація середовища. Властивості тензора коефіцієнтів кубічної поляризації. Чотиреххвильова взаємодія. Рівняння пов'язаних хвиль у середовищах із кубічною поляризацією.
- Тема 2.* Генерація третьої гармоніки. Умова фазового синхронізму. Просторовий синхронізм. Генерація другої гармоніки у центросиметричних кристалах.
- Тема 3.* Електрооптичний та оптичний ефект Керра, їх спостереження і застосування. Властивості тензора коефіцієнтів ефекту r_{ijkl} .
- Тема 4.* Ефекти самовпливу у середовищах із кубічною поляризацією. Самофокусування та самодефокусування.
- Тема 5.* Оптичні солітони у нелінійно-оптичних середовищах.
- Тема 6.* Ефект самомодуляції та його прояв у спектрах компресії та декомпресії лазерних імпульсів.
- Тема 7.* Самодифракція, самовідбивання та динамічна голографія.
- Тема 8.* Оптична бістабільність у нелінійних середовищах. Нелінійний резонатор Фабрі–Перо. Мультистабільність.
- Тема 9.* Вироджена чотиреххвильова взаємодія. Обернення хвильового фронту та його застосування.

Розділ 3. Вимушене розсіювання світла

- Тема 1.* Види розсіяного випромінювання. Вимушене комбінаційне розсіювання світла.
- Тема 2.* Вимушене розсіювання Мандельштама–Бріллюена. Інші види вимушеного розсіювання світла.

Розділ 4. Основи резонансної нелінійної оптики

- Тема 1.* Нелінійний ефект насичення. Спектральні провали Беннета та Лемба. Застосування ефекту насичення.
- Тема 2.* Двофотонне поглинання світла, його застосування у спектроскопії.

Розділ 5. Резонансна нестационарна нелінійна оптика

- Тема 1.* Дворівневий атом у сильному світловому полі. Осциляції Рабі. Оптична нутація та вільне затухання поляризації.
- Тема 2.* Поняття площі імпульсу. Фотонне відлуння. Самоіндукована прозорість.

Розділ 6. Нелінійна оптика фоторефрактивних кристалів

- Тема 1.* Фоторефрактивні кристали. Механізми перетворень у фоторефрактивних кристалах. Теорія перетворень у фоторефрактивних кристалах.
- Тема 2.* Розповсюдження світлових хвиль у фоторефрактивних кристалах. Двопучкова схема. Вироджена чотиреххвильова взаємодія у фоторефрактивних кристалах. Шумові ґратки у фоторефрактивних кристалах.

Розділ 7. Нелінійні оптичні явища у обмежених середовищах

- Тема 1.* Поверхневі хвилі на границі розділу двох середовищ. Генерація другої гармоніки за участю поверхневих електромагнітних хвиль. Генерація періодичних структур на поверхні твердих тіл.

Тема 2. Планарні хвилеводи та їх оптичні властивості. Нелінійна оптика планарних хвилеводів. Механізми перетворень у фотошарах Генерація періодичних структур у нелінійних планарних хвилеводах, та їх застосування.

Розділ 8. Просторово-часова нестійкість та формування квазікристалів

Тема 1. Приклади просторово-часових нестійкостей. Просторово-часова нестійкість у зустрічних лазерних пучках і формування гексагонів.

Тема 2. Просторово-часова нестійкість у нелінійних планарних хвилеводах. Фотонні кристали та нелінійна оптика.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
		л	п	лаб.	інд.	с. р.		л	п	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Основні рівняння нелінійної оптики, квадратична поляризація середовища та пов'язані з нею ефекти												
Тема 1	3	1				2						
Тема 2	3	1				2						
Тема 3	3	1				2						
Тема 4	3	1				2						
Тема 5	3	1				2						
Тема 6	3	1				2						
Тема 7	2	1				1						
Разом за розділом 1	20	7				13						
Розділ 2. Кубічна поляризація середовища та пов'язані з нею ефекти												
Тема 1	3	1				2						
Тема 2	2	1				1						
Тема 3	2	1				1						
Тема 4	2	1				1						
Тема 5	3	1				2						
Тема 6	2	1				1						
Тема 7	2	1				1						
Тема 8	2	1				1						
Тема 9	3	1				2						
Разом за розділом 2	21	9				12						
Розділ 3. Вимушене розсіювання світла												
Тема 1	2	1				1						
Тема 2	2	1				1						
Разом за розділом 3	4	2				2						
Розділ 4. Основи резонансної нелінійної оптики												
Тема 1	4	2				2						
Тема 2	3	2				1						
Разом за розділом 4	7	4				3						

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
		л	п	лаб.	інд.	с. р.		л	п	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 5. Резонансна нестаціонарна нелінійна оптика												
Тема 1	3	2				1						
Тема 2	3	2				1						
Разом за розділом 5	6	4				2						
Розділ 6. Нелінійна оптика фоторефрактивних кристалів												
Тема 1	2	1				1						
Тема 2	2	1				1						
Разом за розділом 6	4	2				2						
Розділ 7. Нелінійні оптичні явища у обмежених середовищах												
Тема 1	2	1				1						
Тема 2	2	1				1						
Разом за розділом 7	4	2				2						
Розділ 8. Просторово-часова нестійкість та формування квазікристалів												
Тема 1	2	1				1						
Тема 2	2	1				1						
Разом за розділом 8	4	2				2						
Індивідуальні завдання												
Курсова робота	20					20						
Усього годин	90	32				58						

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

Семінарські (практичні, лабораторні) заняття навчальним планом не передбачені.

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Вивести хвильове рівняння з рівнянь Максвелла у припущенні відсутності магнітних ефектів та нелінійності поляризації середовища по нелінійному полю	2
2	Математично обґрунтувати занулення частини коефіцієнтів тензору квадратичної поляризації d_{ijk} на прикладі кристалу орторомбічної симетрії	2
3	Обчислити максимальну досяжну інтенсивність другої гармоніки 2ω через товщину кристала, його показники заломлення на частотах ω та 2ω та через інтенсивність хвилі з частотою ω , якою опромінюється кристал	2
4	Вивести залежність показника заломлення незвичайної хвилі в одноосному кристалі від кута між напрямом розповсюдження світлового пучка та оптичною віссю, при відомих показниках заломлення кристала n_o та n_e	2
5	Вивести залежність інтенсивності хвилі на виході параметричного підсилювача від товщини кристала	2
6	Вивести залежність інтенсивності хвилі від товщини кристала	2

	хвилі на виході при параметричному перетворенні частоти вгору	
7	Обчислити показники заломлення одноосного кристалу, який стає двохосним під дією статичного електричного поля, від величини поля	1
8	Математично обґрунтувати занулення частини коефіцієнтів тензору квадратичної поляризації d_{ijkl} на прикладі газу чи рідини	2
9	Пояснити механізм досягнення виконання умови фазового синхронізму при генерації третьої гармоніки у суміші газів	1
10	Пояснити вплив форми молекул рідини на величину оптичного ефекту Керра у рідинах	1
11	Викласти теорію рухомих фокусів при опромінюванні товстого нелінійно-оптичного середовища імпульсним лазерним випромінюванням	1
12	Вивести функцію амплітуди одновимірного солітону від координати за допомогою нелінійного рівняння Шрьодінгера	2
13	Пояснити існування інтерференційних смуг у спектрі випромінювання при проходженні лазерного імпульсу крізь Керрівське середовище	1
14	Пояснити вплив фазового зсуву між інтерференційним полем та модуляцією показника заломлення Керрівського середовища на перекачку енергії між пучками, що інтерферують	1
15	Викласти умови виникнення бістабільності у інтенсивності на виході резонатора Фабрі–Перо, заповненого нелінійно-оптичною речовиною	1
16	Вивести порогову умову генерації лазерного випромінювання при використанні нелінійного дзеркала (інвертора) у якості одного з дзеркал лазерного резонатора	2
17	Ознайомитись із методом використання когерентного антистоксового випромінювання (КАРС) для дослідження коливального спектру речовини	1
18	Ознайомитись із результатами вивчення вимушеного розсіяння на крилах Релеєвської лінії	1
19	Обчислити контур Фохта як інтеграл згортки лоренцевого контуру по гаусовій функції розподілу швидкостей атомів газу	2
20	Ознайомитись із методом бездоплерівської спектроскопії з використанням двофотонного поглинання	1
21	Вивести формули для частоти та амплітуди осциляцій Рабі для атома у сильному світловому полі	1
22	Схожості та відмінності 2π -імпульсу при самоіндукованій прозорості від оптичного солітону у прозорому середовищі	1
23	Ознайомитись із виведенням рівнянь Вінецького–Кухтарєва для фотоперетворень у фоторефрактивних кристалах	1
24	Ознайомитись із типами фоторефрактивних сегнетоелектриків	1
25	Ознайомитись із методами введення та виведення поверхневих електромагнітних хвиль	1
26	Ознайомитись із типами ґраток, що розвиваються у хвилеводі на інтерференції лазерного пучка з хвилеводними модами	1
27	Ознайомитись з результатами дослідів по розвиненню нелінійних структур у системах з двовимірним зворотним зв'язком	1
28	Ознайомитись із результатами експериментів з формування гексагонів у нелінійних планарних хвилеводах	1

29	Індивідуальне завдання (курсова робота)	20
	Разом	58

6. Індивідуальні завдання

№ з/п	Теми курсових робіт
1	Особливості генерації другої та третьої гармоніки у кристалах з квадратичною та кубічною складовими поляризації середовища
2	Параметричні ефекти у нелінійній оптиці
3	Параметрична генерація вимушеного випромінювання
4	Самофокусування та самодефокусування світлового пучка у нелінійних оптичних середовищах
5	Само модуляція та компресія імпульсів у нелінійних оптичних середовищах
6	Ефекти Поккельса та Керра як нелінійні оптичні ефекти
7	Оптична бістабільність у нелінійних середовищах
8	Механізм перетворень у фоторефрактивних кристалах
9	Шумові ґратки у фоторефрактивних кристалах
10	Генерація другої гармоніки за участю поверхневих електромагнітних хвиль

7. Методи навчання

1. Проведення лекційних занять
2. Самостійна робота студентів з вивчення додаткових матеріалів з курсу

8. Методи контролю

1. Поточний контроль при проведенні аудиторних занять
2. Індивідуальне завдання: курсова робота
3. Залік

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання			Залік	Сума
Поточний контроль при проведенні аудиторних занять	Індивідуальне завдання (курсова робота)	Разом		
30	10	40	60	100

Досягнення студентів з навчальної дисципліни «Нелінійна оптика» оцінюються в балах, загальна сума яких становить 100. Вона складається з 40 балів, які студент може отримати протягом семестру, та 60 балів, які може отримати при проходженні підсумкового контролю у вигляді заліку.

40 балів протягом семестру – це 30 балів, які нараховуються при проведенні аудиторних занять, та 10 балів за індивідуальне завдання (курсову роботу).

30 балів протягом семестру нараховуються при проведенні лекційних занять за відповіді на усні запитання, поставлені викладачем. Опитування проводяться починаючи з другої двогодинної лекції (тобто на 15 з 16 лекцій) та стосуються матеріалу, викладеного на попередніх лекціях. За умови правильних відповідей на питання, нараховується 2 бали за кожну лекцію.

Курсова робота є індивідуальним завданням, яке студент виконує на протязі семестру і надає для оцінювання перед заліком. Курсові роботи оцінюються за шкалою 0–10 балів виходячи з їх відповідності завданням і повноти виконання.

Залік проводиться у письмовому вигляді шляхом написання студентами відповідей на поставлені запитання. Завдання на залікову роботу містить два запитання. Відповідь на перше запитання оцінюється за шкалою 0–25 балів, відповідь на друге – за шкалою 0–35 балів. Тобто максимальною оцінкою за залікову роботу є 60 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90–100	відмінно	зараховано
70–89	добре	
50–69	задовільно	
1–49	незадовільно	не зараховано

10. Рекомендована література

Основна література

1. Shen Y. R. The Principles of Nonlinear Optics. – Wiley, New York., 2002. – 576 p.
2. Yariv A. Quantum Electronics. – Wiley, New York., 1988. – 693 p.
3. Yariv A., Yeh P. Optical Waves in Crystals. – Wiley, New York., 2002. – 604 p.

Допоміжна література

1. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Seventh Edition. – Cambridge University Press, 2020. – 992 p.
2. Ditchburn R. W. Light. – Dover Publications, 2011. – 736 p.

11. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення

1. <https://www.nlosource.com/> – NLO Source – The Nonlinear Optics Web Site.