

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра квантової радіофізики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан факультету радіофізики,
біомедичної електроніки та
комп'ютерних систем



Сергій ШУЛЬГА

“ 24 ” червня 2024 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

ЛАЗЕРНІ РЕЗОНАТОРИ

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти Другий магістерський рівень вищої освіти

галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)

спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(шифр і назва)

освітня програма Радіофізика та електроніка
(шифр і назва)

спеціалізація _____
(шифр і назва)

вид дисципліни За вибором
(обов'язкова / за вибором)

факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

2024 / 2025 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою факультету радіофізики,
біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

“ 24 ” червня 2024 року, протокол № 6

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)

завідувач кафедри квантової радіофізики, д.ф.-м.н., професор Вячеслав МАСЛОВ

Програму схвалено на засіданні кафедри квантової радіофізики

Протокол від “ 20 ” червня 2024 року № 11

Завідувач кафедри квантової радіофізики



(підпис)

проф. Вячеслав МАСЛОВ

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої (професійної/наукової) програми (керівником
проектної групи) Радіофізика та електроніка

назва освітньої програми

Гарант освітньої (професійної/наукової) програми

(керівник проектної групи) проф. Вячеслав МАСЛОВ



(підпис)

Вячеслав МАСЛОВ


(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Протокол від “ 24 ” червня 2024 року № 6

Голова методичної комісії факультету радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем



(підпис)

(проф. Олександр БУТРИМ)

(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “Лазерні резонатори” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки

магістр
(назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня)
спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма Радіофізика та електроніка
спеціалізації _____

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є забезпечення відповідним сучасним вимогам знань студентів про процеси формування когерентного випромінювання в лазерних резонаторах і методи їхнього аналізу; вивчення факторів, що визначають просторову структуру лазерного випромінювання.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є дати рекомендації що до вибору типу і параметрів резонаторів; розглянуті різні методи впливу на характеристики випромінювання шляхом видозміни резонаторів і внесення в них додаткових елементів.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- K01. Здатність до абстрактного та системного мислення, аналізу та синтезу.
- K02. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- K03. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.
- K04. Здатність бути критичним і самокритичним.
- K05. Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- K06. Навички міжособистісної взаємодії.
- K07. Навички здійснення безпечної діяльності.
- K08. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт.
- K09. Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків.
- K10. Прагнення до збереження навколишнього середовища.
- K11. Здатність діяти соціально відповідально та свідомо. Готовність діяти в нестандартних ситуаціях.
- K12. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.
- K13. Здатність спілкуватися іноземною мовою.
- K14. Здатність реалізувати свої права і обов'язки як члена суспільства, усвідомлювати цінності громадянського (вільного демократичного) суспільства та необхідність його сталого розвитку, верховенства права, прав і свобод людини і громадянина в Україні.
- K15. Здатність зберігати та примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства на основі розуміння історії та закономірностей розвитку предметної області, їх місця у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій, використовувати різні види та форми рухової активності для активного відпочинку та ведення здорового способу життя.
- K16. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної теоретичної та прикладної фізики.
- K17. Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики при вивченні та дослідженні фізичних явищ і процесів.
- K18. Здатність працювати із науковим обладнанням та вимірювальними

приладами, обробляти та аналізувати результати досліджень.

K19. Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати числові методи для розв'язування фізичних задач і моделювання фізичних систем.

K20. Здатність виконувати теоретичні та експериментальні дослідження автономно та у складі наукової групи, та керувати колективом у сфері своєї професійної діяльності.

K21. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

K22. Розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю.

K23. Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних досліджень.

K24. Орієнтація на найвищі наукові стандарти

– обізнаність щодо фундаментальних відкриттів і теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики та інших природничих наук.

K25. Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту.

1.3. Кількість кредитів – 6

1.4. Загальна кількість годин – 180

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
За вибором
Денна форма навчання
Рік підготовки
1-й
Семестр
2-й
Лекції
32 год.
Практичні, семінарські заняття
16
Лабораторні заняття
–
Самостійна робота
132 год.
Індивідуальні завдання
–
Контрольні роботи – 2

1.6. Заплановані результати навчання

Як результат навчання студенти повинні:

: знати: типи, характеристики і методи розрахунку основних видів лазерних резонаторів;

вміти: здійснювати вибір, розрахунки параметрів і характеристик лазерних резонаторів.

Використовувати знання в галузі прикладної фізики, математики, електроніки та інформаційних технологій для виконання наукових досліджень та розв'язання виробничих задач.

Встановлювати та аргументувати нові залежності між параметрами та характеристиками фізичних систем

- Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною
- ПР01. Здатність продемонструвати знання і розуміння наукових і математичних принципів, необхідних для розв'язування інженерних задач та виконання досліджень в галузі теоретичної та прикладної фізики, ядерної та термоядерної енергетики, тощо.
 - ПР02. Здатність продемонструвати знання сучасного стану справ, тенденції розвитку, найбільш важливі розробки та новітні технології в галузі теоретичної та прикладної фізики, радіофізики та електроніки, ядерної та термоядерної енергетики, космічних досліджень, тощо.
 - ПР03. Здатність продемонструвати поглиблені знання у вибраній спеціалізації.
 - ПР04. Здатність продемонструвати розуміння впливу технічних рішень в суспільному, економічному, соціальному і екологічному контексті.
 - ПР05. Вміти вибирати методи і моделювати явища та процеси в динамічних лінійних і нелінійних системах, а також аналізувати отримані результати.
 - ПР06. Вміти самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати.
 - ПР07. Вміти застосовувати інформаційно-комунікаційні технології та навички програмування для розв'язання типових наукових і інженерних завдань.
 - ПР08. Вміти застосовувати отримані знання й практичні навички, адаптувати результати наукових досліджень під час створення нового та експлуатації існуючого радіотехнічного, електронного, електротехнічного устаткування та його складових.
 - ПР09. Вміти застосовувати знання і розуміння для розв'язування задач аналізу та синтезу елементів та систем, характерних обраній спеціалізації.
 - ПР10. Вміти здійснювати пошук, аналізувати та критично оцінювати інформацію з різних джерел.
 - ПР11. Вміти ефективно працювати як індивідуально, так і у складі команди.
 - ПР12. Вміти поєднувати теорію та практику, а також приймати рішення та виробляти стратегію діяльності для вирішення завдань спеціалізації з урахуванням загальнолюдських цінностей, суспільних, державних та виробничих інтересів.
 - ПР13. Вміти самостійно виконувати експериментальні дослідження та застосовувати дослідницькі навички за професійною тематикою.
 - ПР14. Вміти критично проаналізувати основні показники функціонування системи та оцінити використані технічні рішення та обладнання.
 - ПР15. Вміти застосовувати системний підхід, інтегруючи знання з інших дисциплін та враховуючи нетехнічні аспекти, під час розв'язування інженерних задач обраної спеціалізації та проведення досліджень.
 - ПР16. Вміти аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення.
 - ПР17. Вміти ефективно спілкуватись на професійному та соціальному рівнях, включаючи усну та письмову комунікацію іноземною мовою.
 - ПР18. Вміти представляти та обговорювати отримані результати та здійснювати трансфер набутих знань.
 - ПР19. Здатність адаптуватись до нових умов та самостійно приймати рішення.
 - ПР20. Здатність усвідомлювати необхідність навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань.
 - ПР21. Здатність відповідально ставитись до виконуваної роботи та досягати поставленої мети з дотриманням вимог професійної етики.
 - ПР22. Здатність демонструвати розуміння засад охорони праці, електробезпеки та їх застосування

2. Тематичний план навчальної дисципліни

РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАННЯ ПОЛЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ВІДКРИТИХ РЕЗОНАТОРАХ

Тема 1. Відкриті резонатори. Початок теорії.

Спонтанне і змушене випромінювання, поглинання. Принцип роботи лазера. Умова забезпечення генерації в лазері. Резонансні частоти відкритого резонатора. Неможливість використання об'ємних резонаторів в оптичному діапазоні. Перехід від об'ємного резонатора до відкритого. Основні відмінності відкритого резонатора від об'ємного. Частоти плоскопараллельного відкритого резонатора. Поперечні й поздовжні моди відкритих резонаторів, їхня графіка. Добротність і види втрат відкритого резонатора. Дифракційні втрати. Число Френеля. Основні параметри і види відкритих резонаторів.

Тема 2. Геометрооптичний підхід до вивчення відкритих резонаторів.

Умова стійкості для лінзового хвилеводу. Стійкі і нестійкі відкриті резонатори; діаграма стійкості. Матриця передачі луча у вільному просторі. Закон ABCD. Матриці перетворення луча в лінзі, на ділянці вільне простір - лінза. Матриця перетворення луча при відбитті від дзеркала. Матриця передачі луча для подвійного проходу резонатора.

Тема 3. Хвильовий підхід до вивчення відкритих резонаторів.

Дифракційний інтеграл Гюйгенса-Френеля. Інтегральне рівняння Фокса-Ли. Власні моди і власні значення. Відкритий резонатор зі сферичними дзеркалами. Частотний спектр резонатора. Конфокальний резонатор. Частотний спектр резонатора. Еквівалентні резонатори. Відкритий резонатор, еквівалентний резонатору із внутрішньою лінзою. Відкритий резонатор з діафрагмою.

РОЗДІЛ 2. ГАУСОВИ ПУЧКИ. НЕСТІЙКИ І ХВИЛЕВІДНИ РЕЗОНАТОРИ

Тема 1. Гаусові пучки у вільному просторі і у резонаторі.

Просторова форма гаусова пучка. Поширення гаусова пучка у вільному просторі. Радіус кривизни поверхні постійної фази гаусова пучка. Основні співвідношення для параметрів гаусових пучків, комплексні параметри гаусова пучка. Гаусов пучок як рішення параболічного рівняння. Узагальнення параболічного рівняння на моди високих порядків. Перетворення гаусова пучка у вільному просторі. Лінза як фазовий коректор. Перетворення гаусова пучка в лінзі. Перетворення гаусова пучка в лінзовій системі. Закон ABCD для світлових променів і гаусових пучків. Самовідтворення гаусова пучка при відбитті від сферичного дзеркала. Гаусов пучок у резонаторі (більші апертури дзеркал). Симетричний резонатор. Гаусов пучок у резонаторі (більші апертури дзеркал). Несиметричний резонатор. Гаусов пучок у резонаторі (кінцева апертура дзеркал). Область існування "гаусових" резонаторів.

Тема 2. Нестійкі резонатори.

Гомоцентричність пучка, виведеного з нестійкого резонатора. Втрати в нестійкому резонаторі по геометрооптичної теорії. Застосування закону ABCD до нестійких резонаторів. Переваги нестійких резонаторів.

Тема 3. Хвильові резонатори.

Порожнистий плоский діелектричний шар (геометрооптичний підхід). Порожнистий діелектричний хвилевід круглого поперечного переріза (строгий хвильовий підхід Стреттона). Наближення Маркатили-Шмельтцера. Типи коливань порожнистого діелектричного хвилеводу. Види порожніх круглих і прямокутних хвилеводів. Порожнистий металодіелектричний хвилевід прямокутного поперечного переріза. Класи

мод хвилевідного резонатора. Ітераційний і матричний підходи до розрахунку характеристик хвилевідного резонатора. Втрати на узгодження хвилеводу із дзеркалом у хвилевідному резонаторі.

Тема 4. Принципи кутової і частотної селекції мод.

Різні типи кутової і частотної селекції. Застосування ширококугових поглинаючих фільтрів і дисперсійних елементів. Загальні зауваження про селекцію подовжніх мод. Резонатори з анізотропними елементами. Нелінійно-оптичний метод частотної селекції.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
Л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Формування поля випромінювання в відкритих резонаторах.						
Тема 1. Відкриті резонатори. Початок теорії.	21	4	2			15
Тема 2. Геометрооптический підхід до вивчення відкритих резонаторів.	29	6	2			21
Тема 3. Хвильовий підхід до вивчення відкритих резонаторів.	29	6	2			21
Разом за розділом 1	79	16	6			57
Розділ 2. Гаусови пучки. Нестійки і хвилевідні резонатори.						
Тема 4. Гаусови пучки у вільному просторі і у резонаторі.	40	6	4			30
Тема 5. Нестійки резонатори.	19	2	2			15
Тема 6. Хвилевідні резонатори.	23	6	2			15
Тема 7. Принципи кутової і частотної селекції мод.	19	2	2			15
Разом за розділом 2	101	16	10			75
Усього годин	180	32	16			132

4. Темі практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Геометрична оптика лазерних резонаторів у параксіальному наближенні.	2
2	Методи рішення інтегрального рівняння в теорії резонаторів.	2
3	Електричне і магнітне поле гаусова пучка	2
4	Перетворення гаусова пучка в квадратичному середовищі.	2

5	Матричний метод розрахунку лазерних резонаторів	2
6	Лазер з нестійким резонатором телескопічного типу. Облік дифракції на краї дзеркала.	2
7	Порожнистий металодіелектричний хвилевід прямокутного поперечного переріза.	2
8	Інтерференційні методи селекції.	2
	Разом	16

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи: робота з літературою, підготовка до лекційних занять	Кількість годин
1	Тема 1. Випромінювання в резонаторе.	15
2	Тема 2. Побудова хвильового поля по променевій картині.	21
3	Тема 3. Чисельні методи в задачах дифракційної оптики лазерів.	21
4	Тема 4. Гаусові пучки – рішення рівнянь Максвелла. Гаусов пучок із двома системами головних осей	30
5	Тема 5. Нестійки резонатори с гаусовими дзеркалами.	15
6	Тема 6. Деякі застосування хвилевідних лазерів.	15
7	Тема 7. Задачі керування параметрами лазерного випромінювання.	15
	Разом	132

6. Індивідуальні завдання

Індивідуальних завдань не заплановано.

7. Методи навчання

Курс побудовано на лекційних заняттях, що знайомлять студентів з теоретичним матеріалом, та з практичних занять, що складаються з трьох частин: 1) усне опитування по теоретичному матеріалу; 2) перевірка домашнього завдання; 3) розв'язання типових задач за темою, що вивчається. Питання для теоретичного опитування, приклади розв'язання типових завдань, завдання для самостійної роботи студентів та роботи на практичних заняттях наведені в рекомендованій літературі по даному курсу. На самостійну роботу виведено низку питань, що стосуються змісту курсу, що вивчається, але не входять до лекцій та практик.

8. Методи контролю

Поточний контроль включає роботу на практичних заняттях і самостійну роботу, виконання домашніх завдань (20 балів).

Після вивчення кожного розділа курсу проводиться письмова контрольна робота, яка оцінюється в відповідних балах.

Підсумковий контроль – екзамен (40 балів).

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль та самостійна робота							Разом	Екзамен.	Сума		
Розділ 1			КР	Розділ 2				КР	60	40	100
T1	T2	T3		T4	T5	T6	T7				
2	4	4		2	2	4	2				
10			20	10				20			

T1, T2 ... – теми розділів.

КР - контрольна робота, передбачена навчальним планом

Розділ зараховується студентові, якщо він набирає не менш 50 % можливих балів за тему. Студент допускається до екзамену, якщо всі розділи зараховані. Студент не допускається до екзамену, якщо набирає протягом семестру менше 10 балів. Студенти з підсумковим рейтингом < 10 вважаються такими, що не допущені до екзамену з дисципліни. Їм перед сесією надається можливість підвищити оцінку і отримати допуск до екзамену шляхом виправлення нульових оцінок з окремих видів занять і контрольних завдань. Термін і порядок ліквідації заборгованостей установлюється викладачами, котрі проводять відповідні заняття і контрольні заходи.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

1. Виконання кожного завдання екзаменаційного білета оцінюється балом за таблицею

№ з/п	Кільк. балів	При оцінці відповіді на теоретичні питання	При оцінці розв'язання задачі
1	0	Виявлено, що студент виявив академічну недобросовісність	
2	1-8	Наведено лише визначення термінів, які входять до формулювання питання	Записано коротку умову, наведено діаграму або рисунок до задачі, записано основні закони з цієї теми
3	9-19	Наведено лише загальні відомості	Додатково до п.2 вказано метод розв'язання задачі
4	20-24	Наведено нечітку відповідь	Додатково до п.3 при правильному виборі методу розв'язання задачі допущено грубі помилки
5	25-32	Наведено відповідь з незначними помилками	Додатково до п.3 при правильному виборі методу розв'язання задачі не доведено до кінця
6	33-36	Наведено правильну в цілому відповідь з порушеннями логіки викладення матеріалу або без належних ілюстрацій чи оформлення відповіді ускладнює розуміння тексту	Задачу доведено до правильної кінцевої формули і на тому припинено розв'язання
7	37-40	Повна бездоганна відповідь	Здобуто правильну кінцеву формулу та проведено її аналіз, перевірку на розмірність, вірно визначено числове значення

2. Загальна оцінка екзамена за 40-бальною шкалою розраховується за формулою:

$$\text{Оцінка} = (\text{П1} + \text{П2} + \text{П3}) / 3 ,$$

де П1, П2, П3 – бали за відповіді на окремі завдання екзаменаційного білету.

10. Рекомендована література

Основна література

1. Лазерна фізика : Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В. І. Григоруk, П. А. Коротков, А. І. Хижняк. - 2-е вид. - К. : "МП Леся", 1999. - 526 с.
2. Експериментальна лазерна фізика : Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В. І. Григоруk, А. І. Іванісік, П. А. Коротков. - К. : Віпол, 2004. - 297 с. .
3. Експериментальна лазерна оптика : підручник / В. І. Григоруk, А. І. Іванісік, П. А. Коротков; Київ. нац. ун-т ім. Т.Шевченка. - К., 2007. - 383 с.
4. Formation and selection of transverse modes in laser cavities : monograph / A. V. Degtyarev, V. O. Maslov, V. A. Svich, O. M. Topkov. Kharkiv : V. N. Karazin Kharkiv National University, 2021. – 180 p.

Допоміжна література

1. Основи квантової електроніки : навч. посіб. / О. О. Птащенко; Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова. - О. : Астропринт, 2010. - 390 с.
2. Квантова електроніка : навч. посіб./ О. С. Кривець, О. О. Шматько, О. В. Ющенко. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 340 с.
3. Siegman A.E.: Lasers. University Science Books, 1986.
4. William T. Silfvast: Laser Fundamentals. Cambridge University Press, 2004.
5. Svelto O.: Principles of Laser. Springer, 2004.
6. Verdeyen J.T.: Laser Electronics, Prentice Hall, 1995.
7. Webb C.E.: Handbook of Laser Technology and Applications, Institute of Physics Publishing, 2004.

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

1. Енциклопедія лазерної техніки і технології
<http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
2. Бібліотека книг з лазерів
<http://gen.lib.rus.ec/>