

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені ІВАНА ФРАНКА

Кафедра експериментальної фізики

**“ЗАТВЕРДЖУЮ”**

Декан фізичного факультету

\_\_\_\_\_ проф. Якібчук П.М.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 року

## **РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

### **КВАНТОВА ЕЛЕКТРОНІКА І НЕЛІНІЙНА ОПТИКА**

(шифр і назва навчальної дисципліни)

галузь знань \_\_\_\_\_ 10 Природничі науки \_\_\_\_\_

(шифр і назва галузі знань)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 104 Фізика та астрономія \_\_\_\_\_

(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація 1. Теоретична фізика та астрофізика. 2. Комп'ютерна фізика

факультет \_\_\_\_\_ фізичний \_\_\_\_\_

(назва факультету, відділення)

Робоча програма **Квантова електроніка і нелінійна оптика** для студентів за спеціальністю **104 Фізика та астрономія.**

Розробник *Малий Т.С.*, кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри експериментальної фізики.

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри експериментальної фізики

Протокол від “26” червня 2020 року № 15

Завідувач кафедри експериментальної фізики

\_\_\_\_\_ ( Волошиновський А.С. )  
(підпис) (прізвище та ініціали)

“26” червня 2020 року

Схвалено Вченою радою фізичного факультету

Протокол від. “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 року № \_\_\_

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 року

Голова \_\_\_\_\_ (Якібчук П.М.)  
підпис (прізвище та ініціали)

### 1. Опис навчальної дисципліни

(Витяг з робочої програми навчальної дисципліни “Квантова електроніка і нелінійна оптика”)

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
		<i>денна форма навчання</i>
Кількість кредитів – <b>3,0</b>	Галузь знань: 10 <b><u>Природничі науки</u></b>	Нормативна
Модулів – <b>1</b>	Спеціальність: <b>104 Фізика та астрономія</b>	<i>Рік підготовки:</i>
		<b>4-й</b>
Змістових модулів – <b>3</b>		<i>Семестр:</i>
Загальна кількість годин – <b>90</b>	Освітньо-кваліфікаційний рівень: <b>бакалавр</b>	<b>7-й</b>
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – <b>2</b> самостійної роботи студента – <b>3.625</b>		<i>Лекції</i>
		<b>16 год.</b>
		<i>Лабораторні</i>
		<b>32 год.</b>
		<i>Самостійна робота</i>
<b>42 год.</b>		
	Вид контролю: <b>залік</b>	

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета:** ознайомлення з фізичними основами квантової радіофізики і нелінійної оптики та найважливішими характеристиками відповідних приладів. Основна увага приділяється фізиці і техніці лазерів і типовим явищам нелінійної оптики.

**Завдання:** висвітлення фізичних основ та основних теоретичних засад квантової електроніки і нелінійної оптики, систематичний огляд найновіших експериментальних даних з даного предмета.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен

**знати:**

- історію виникнення квантової електроніки та роль праць вітчизняних фізиків у цій галузі;
- основні фізичні ідеї, що лежать в основі квантових генераторів і підсилювачів;
- характеристики різних типів лазерних активних середовищ;
- системи збудження активних середовищ;
- механізми створення інверсної заселеності рівнів;
- елементи дифракційної теорії оптичних резонаторів;
- конструктивні особливості лазерів різних типів;
- енергетичні характеристики лазерних установок різних типів;
- параметри часової та просторової когерентності;
- характеристики лазерів з керованою добротністю;
- лазери для голографії;
- лазери для техніки, медицини та ін.;
- основні положення техніки безпеки при роботі з лазерними установками;
- фізичні основи явищ нелінійної оптики;
- нелінійно-оптичні кристали: симетрійний і технологічний аспект;
- принципи класифікації явищ нелінійної оптики;
- фізичні механізми нелінійно-оптичних явищ генерації гармонік, вимушеного комбінаційного розсіювання, самофокусування, двофотонного поглинання тощо.

**вміти:**

- розраховувати питому інверсійність активних середовищ твердотільних лазерів;
- здійснювати діагностику лазерних активних середовищ;
- розраховувати ефективності оптичних освітлювачів;
- застосовувати основні прийоми юстування резонаторів, оцінки їх якості та добротності;
- розраховувати оптичні параметри багатошарових лазерних дзеркал;
- аналізувати модову структуру генерації;
- здійснювати селекцію мод;
- застосовувати методи стабілізації роботи лазерів;
- досліджувати пічкову структуру генерації;
- здійснювати Q-модуляцію;
- оптимально вибрати тип серійного лазера для поставленої мети;
- розраховувати конструктивні параметри імпульсних твердотільних лазерів;
- вимірювати енергетичні характеристикти лазерів;
- вимірювати кути розбіжності лазерного випромінювання;
- визначати ступінь когерентності;
- здійснювати юстування лазерних систем з підсилювачами;
- охарактеризувати структурні та симетрійні особливості високоефективних нелінійно-оптичних матеріалів.

### **3. Програма навчальної дисципліни**

#### **Змістовий модуль 1.**

#### **Фізичні основи квантової електроніки. Основні прилади квантової електроніки**

##### **Тема 1. Вступ**

Предмет квантової радіофізики. Історія створення мазерів, лазерів та ін. квантових приладів квантової електроніки. Виникнення і сьогоденний стан досліджень з нелінійної оптики. Бібліографія.

##### **Тема 2. Фізичні основи квантової електроніки. Фізичні основи лазерів**

Квазікласична теорія випромінювання. Теплове випромінювання. Люмінесценція. Черенковське випромінювання. Синхротронне випромінювання. Електронний парамагнітний резонанс. Парамагнітне підсилення. Мазери: принцип роботи, конструктивні особливості, основні характеристики. Квантові стандарти частоти. Спонтанне та індуковане випромінювання. Коефіцієнти Ейнштейна. Інверсна заселеність енергетичних станів. Підсилення світла. Умова самозбудження оптичного резонатора. Розрахунок порогової критичної інверсності заселення робочих рівнів. Методи визначення відносної заселеності метастабільного рівня. Блок-схеми та принципи дії лазерів та оптичного підсилювача.

#### **Змістовий модуль 2.**

#### **Лазери**

##### **Тема 3. Активні середовища лазерів**

Основні вимоги до лазерних активних середовищ. Активація. Сенсibiliзація активних середовищ. Рубін, кристалічна структура і властивості. Енергетична схема і спектри рубіна. Вплив температури, концентрації хрому, електричного і магнітного полів на спектри рубіна. Кристали з домішками 3-валентних рідкісноземельних іонів. Діаграми енергетичних рівнів. Спектри неодимових лазерних матеріалів. Кристали з домішками 2-валентних рідкісноземельних іонів та іонів урану. Лазери на центрах забарвлення. Характеристика та енергетичні схеми активних середовищ газових лазерів: гелій-неонових, аргонових, гелій-кадмієвих, молекулярних лазерів на CO<sub>2</sub> та ін. Активні середовища напівпровідникових лазерних кристалів. Активні середовища рідинних лазерів. Ексімерні лазери. Лазери на вільних електронах. Вибір розміру активного елемента (на прикладі твердотілого лазера). Спектральні методи діагностики активних середовищ.

##### **Тема 4. Системи збудження в різних типах лазерів**

Оптичне збудження. Характеристики імпульсних ламп. Лазери як джерела збудження. Лазерні освітлювачі (одно- і багатоеліпсні, циліндричні круглого перерізу та ін.). Розрахунок їх ефективності. Приклад розрахунку порогової потужності збудження для 3- і 4-рівневих систем. Розподіл енергії оптичного збудження всередині активного зразка (теорія і експеримент). Газорозрядне збудження. Основні процеси в газовому розряді і методи одержання інверсної заселеності. Ефект Лемба-Беннета. Інжекція нерівноважних носіїв струму в напівпровідниках. Збудження напівпровідників пучком швидких електронів. Інші методи збудження лазерних активних елементів. Хімічні лазери. Огляд деяких технічних схем збудження.

##### **Тема 5. Оптичні резонатори**

Наближена теорія оптичних резонаторів. Моді коливань резонатора. Добротність резонатора при урахуванні різних видів енергетичних втрат. Експериментальне визначення

енергетичних втрат резонатора. Число збуджуваних мод. Оцінка необхідної точності юстування резонатора. Елементи хвильової теорії відкритих резонаторів. Резонатори з плоскими дзеркалами. Конфокальні резонатори. Кільцеві та дисперсійні резонатори. Порівняльна характеристика оптичних резонаторів різних типів. Особливості власних коливань заповнених резонаторів. Внутрішні та кільцеві моди. Дзеркала резонаторів. Матеріали для дзеркал, методи виготовлення дзеркал та контролю їх оптичних характеристик. Оптична стійкість дзеркал. Оцінка оптимального коефіцієнта відбивання напівпрозорого дзеркала.

#### **Тема 6. Властивості лазерного випромінювання**

Енергетичні характеристики лазерного випромінювання. Потужність безперервної генерації. Особливості і характеристики імпульсного режиму. Енергетичні характеристики напівпровідникових інжекційних лазерів. Сфокусований лазерний промінь. Когерентність лазерного випромінювання. Частотна та просторова когерентність. Модова структура і спектр генерації. Номограма для розрахунку спектральних характеристик. Методи регулювання довжиною хвилі генерації. Поляризація лазерного випромінювання. Просторова індикатриса лазерного випромінювання. Часові характеристики генерації. Пічкова структура. Моноімпульси генерації та надкороткі лазерні імпульси. Елементи кінетичної теорії лазерної генерації.

#### **Тема 7. Лазери з керованою добротністю. Оптичні підсилювачі**

Принцип Q-модуляції. Активні і пасивні модулятори добротності лазерів. Основні характеристики лазерів з керованою добротністю. Потужність і енергія випромінювання. Часові характеристики. Залежність параметрів гігантських імпульсів від швидкості включення добротності. ККД лазерів з керованою добротністю. Основні закономірності процесу оптичного підсилення. Енергетичні характеристики оптичних підсилювачів. Параметри оптичних підсилювачів серійного виробництва.

### **Змістовий модуль 3. Явища нелінійної оптики**

#### **Тема 8. Фізичні основи і класифікація явищ нелінійної оптики**

Нелінійна поляризація діелектриків. Симетрійні аспекти нелінійно-оптичних явищ. Генерація гармонік оптичного діапазону. Параметрична генерація світла. Вимушене комбінаційне розсіювання. Самофокусування оптичних променів. Багатофотонні процеси. Нелінійна оптична активність. Обернення хвильового фронту. Основні поняття про оптичну бістабільність.

#### 4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин											
	Денна форма						Заочна форма					
	Усього	у тому числі					Усього	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	ср		л	п	лаб	інд	ср
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Модуль 1</b>												
<b>Змістовий модуль 1. Фізичні основи квантової електроніки. Основні прилади квантової електроніки</b>												
Тема 1. Вступ		2		2		2						
Тема 2. Фізичні основи квантової електроніки. Фізичні основи лазерів		2		4		4						
Разом – зм. модуль 1		4		6		6						
<b>Змістовий модуль 2. Лазери</b>												
Тема 3. Активні середовища лазерів		2		4		6						
Тема 4. Системи збудження в різних типах лазерів		2		6		6						
Тема 5. Оптичні резонатори		2		4		6						
Тема 6. Властивості лазерного випромінювання		2		4		6						
Тема 7. Лазери з керованою добротністю. Оптичні підсилювачі		2		6		6						
Разом – зм. модуль 2		10		24		30						
<b>Змістовий модуль 3. Явища нелінійної оптики</b>												
Тема 8. Фізичні основи і класифікація явищ нелінійної оптики		2		2		6						
Разом – зм. модуль 3		2		2		6						
<b>Усього годин</b>		16		32		42						

### 5. Темі семінарських занять

Семінарські заняття у курсі не передбачені.

### 6. Темі практичних занять

Практичні заняття в курсі не передбачені.

### 7. Темі лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Вступне заняття. Вивчення правил техніки безпеки при роботі з лазерами	2
2	Юстування оптичного резонатора та вивчення умов генерації <i>He-Ne</i> лазера. Моді генерації.	4
3	Вивчення спектра поглинання і енергетичної схеми рубіну	6
4	Визначення напруги збудження і енергії випромінювання рубінового лазера	4
5	Дослідження спектрального контура лінії генерації <i>He-Ne</i> лазера за допомогою інтерферометра Фабрі-Перо.	6
6	Визначення характеристик випромінювання напівпровідникового лазера	4
7	Захист рефератів	4
8	Заключне заняття	2
	Разом	32

### 8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Підготовка реферата з питань техніки безпеки при роботі з лазерами	2
2	Підготовка наукового реферата за вибраною темою (перелік тем подано нижче)	8
3	Підготовка до лабораторних робіт	10
4	Опрацювання отриманих експериментальних результатів і підготовка звіту про виконання лабораторних робіт	8
5	Підготовка до колоквиуму	14
	Разом	42

#### Темі наукових рефератів, що даються студентам на вибір:

1. Історія квантової електроніки, хронологічна таблиця основних робіт.
2. Історія нелінійної оптики.
3. Нобелівські премії з галузей квантової електроніки, голографії та нелінійної оптики.
4. Класифікація лазерів і типові приклади.
5. Сучасні газові лазери вітчизняного серійного виробництва.
6. Сучасні рубінові лазери.
7. Сучасні неодимові лазери.
8. Сучасні рідинні лазери.
9. Сучасні напівпровідникові лазери.
10. Сучасні ексимерні лазери.
11. Лазери на центрах забарвлення.
12. Лазери на вільних електронах.
13. Лазери на випарних металах.



14. Мідні лазери.
15. Гелій-кадмієві лазери.
16. Гелій-селенові лазери.
17. Азотні лазери.
18. Хімічні лазери.
19. СО-лазери.
20. СО<sub>2</sub>-лазери.
21. Аргонові лазери.
22. Йодний лазер.
23. Газодинамічні лазери.
24. Мінілазери.
25. Огляд серійних зарубіжних лазерів.
26. Фізичні процеси в газовому розряді і механізм одержання інверсної заселеності рівнів в гелій-неонових лазерах.
27. Розрахунок порогової потужності збудження для 3-рівневої і 4-рівневої систем.
28. Задача про розподіл енергії оптичного збудження всередині циліндричного твердотілого активного елемента.
29. Системи охолодження і термостабілізації в потужних лазерних установках.
30. Промислові технологічні СО<sub>2</sub>-лазери
31. Лазерні технологічні установки серії "Квант".
32. Методи модуляції лазерного випромінювання.
33. Типи оптичних резонаторів.
34. Стійкі та нестійкі оптичні резонатори.
35. Явище провалу Лемба, його використання для стабілізації частоти лазерного випромінювання.
36. Задача синтезу лазерних дзеркал.
37. Методи селекції мод в оптичних резонаторах.
38. Методи стабілізації частоти генерації.
39. Методи одержання надкоротких лазерних імпульсів. Механізми синхронізації мод.
40. Резонатори з керованою добротністю.
41. Матеріали для виготовлення лазерних інтерференційних дзеркал.
42. Методи керування частотою генерації.
43. Застосування ЕОМ при проектуванні лазерів.
44. Оптичні підсилювачі.
45. Стандарти в метрології лазерного випромінювання.
46. Методи і прилади для вимірювання параметрів лазерів.
47. Типи і характеристики сучасних приладів для вимірювання енергетичних параметрів лазерного випромінювання.
48. Вимірювання параметрів когерентності лазерного випромінювання.
49. Систематизація відомостей про основні області застосування лазерів різних типів.
50. Застосування лазерів у техніці і технології.
51. Застосування лазерів у медицині і біології.
52. Лазерні установки для медицини.
53. Лазери в сільському господарстві.
54. Лазерна фотохімія.
55. Лазерні технології в мікроелектроніці.
56. Технологія лазерної імплантації та легування матеріалів.
57. Технологічні лазери для обробки матеріалів.
58. Голографія.
59. Лазери для голографії.

60. Лазерні гіроскопи.
61. Лазерне розділення ізотопів.
62. Лазери і керований термоядерний синтез.
63. Лазерні принтери.
64. Лазерний відео- та звукозапис.
65. Лазерна локація Місяця.
66. Лідари. Лазерний екологічний моніторинг.
67. Лазери в системах зв'язку.
68. Шуми лазерів.
69. Лазерна метрологія.
70. Сучасний стан лазерного ринку у світі.
71. Мазери.
72. Квантові парамагнітні підсилювачі.
73. Квантові стандарти частоти.
74. Класифікація явищ нелінійної оптики.
75. Нелінійно-оптичні кристали і функціональні елементи на їх основі.
76. Параметрична генерація світла.
77. Явище вимушеного комбінаційного розсіювання світла.
78. Багатофотонні процеси.
79. Нелінійна оптична активність.
80. Явище обернення хвильового фронту.
81. Оптична бістабільність.
82. Схеми генерації другої гармоніки.
83. Генерація вищих гармонік.
84. Явище самофокусування оптичних променів.
85. Правила техніки безпеки при використанні лазерів.
86. Нові ідеї в квантовій електроніці.
87. Методи діагностики лазерних активних середовищ.
88. Технологія виготовлення лазерних матеріалів. Основні стандарти.
89. Лазерне охолодження атомних систем.

## ***10. Методи контролю***

Контроль засвоєння матеріалу включає:

Робота на лабораторних заняттях (40 балів), робота на лекціях (10 балів), контрольна перевірка знань за змістовими модулями (40 балів), підсумкове заняття (10 балів). Сумарна оцінка, таким чином, виставляється за 100-бальною шкалою;

## ***11. Розподіл балів, що присвоюється студентам***

***Розподіл балів, які отримують студенти (для заліку)***

<b>Поточне тестування та самостійна робота</b>			<b>Підсумкове заняття</b>	<b>Сума</b>
<b>Змістовий модуль 1 Змістовий модуль 2 Змістовий модуль 3</b>				
<b>Л</b>	<b>Лаб.</b>	<b>К</b>		
10	40	40	10	100

### Шкала оцінювання: Університету, національна та ECTS

Оцінка в балах	Оцінка ECTS	Визначення	За національною шкалою	
			Екзаменаційна оцінка, оцінка з диференційованого заліку	Залік
90 – 100	A	<i>Відмінно</i>	<i>Відмінно</i>	<i>Зараховано</i>
81-89	B	<i>Дуже добре</i>	<i>Добре</i>	
71-80	C	<i>Добре</i>		
61-70	D	<i>Задовільно</i>	<i>Задовільно</i>	
51-60	E	<i>Достатньо</i>		

### 12. Методичне забезпечення

1. Довгий Я.О. Лазерний практикум. Навчальний посібник. Львів: В-во ЛНУ, 2004. –210с.

### 13. Рекомендована література

#### Базова

1. Білий М.У. Основи нелінійної оптики та її застосування. Навч. посібник. К.: Вид. центр "Київський Університет", 1999. – 172 с.
2. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. К.: "Вища школа", 1988. – 383 с.
3. Григорук В.І., Коротков П.А., Хижняк А.І. Лазерна фізика. К., 1997. – 480 с.
4. Довгий Я.О., Кітик І.В. Електронна будова і оптика нелінійних кристалів. Львів: "Світ", 1996. – 176 с.
5. Звелто О. Принцип лазерів. М.: "Мир", 1984. – 408 с.
6. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: "Наука", 1988. – 336 с.
7. Качмарек Ф. Введение в физику лазерів. М.: "Мир", 1981. – 540 с.
8. Милославский В.К. Нелинейная оптика. Х.: Вид. центр ХНУ, 2008. – 312 с.
9. Ярив А. Квантовая электроника и нелинейная оптика. Перевод с англ. М.: "Сов. радио", 1973. – 456 с.

#### Допоміжна

1. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: "Физматлит", 2004. – 512 с.
2. Справочник по лазерной технике. Перевод с нем. М.: "Энергоатомиздат", 1991. – 544 с.
3. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика. М.: "Мир", 1976. – 262 с.

### 14. Інформаційні ресурси

1. Щомісячний журнал „Квантовая электроника” (у Львові цей журнал регулярно отримує Наукова бібліотека ім. В.Стефаника).
2. Матеріали з Інтернету.