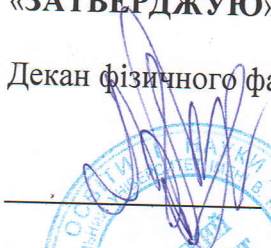


Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
Кафедра фізичної оптики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан фізичного факультету

  
\_\_\_\_\_  
Руслан BOVK  
« 29 » серпня 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

**Квантова електроніка**

|                     |                            |
|---------------------|----------------------------|
| 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:

Лимар Валентин Іванович, старший викладач каф. фізичної оптики  
Маковецький Євген Дмитрович, канд. фіз.-мат. наук, доцент каф. фізичної оптики

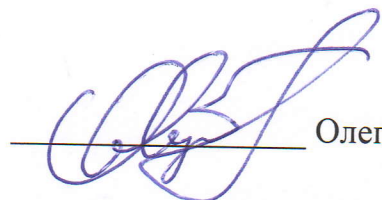
Програму схвалено на засіданні кафедри фізичної оптики.

Протокол від 27.08.2025 р. № 1.

В. о. завідувача кафедри фізичної оптики  Сергій ТАРАПОВ

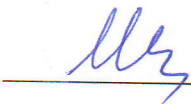
Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми «Фізика».

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 «Квантова електроніка» 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 – набуті знань щодо теорії та устрою квантових генераторів випромінювання, особливостей їх устрою при генерації різними активними середовищами та в різних режимах.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни – вивчити матеріал щодо теорії та устрою квантових генераторів випромінювання 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 – 5.

1.4. Загальна кількість годин – 150.

| 1.5. Характеристика навчальної дисципліни |                                     |
|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| Нормативна / за вибором                   |                                     |
| Денна форма навчання                      | Заочна (дистанційна) форма навчання |
| Рік підготовки                            |                                     |
| 4-й                                       |                                     |
| Семестр                                   |                                     |
| 8-й                                       |                                     |
| Лекції                                    |                                     |
| 48 год.                                   |                                     |
| Практичні, семінарські заняття            |                                     |
| 24 год.                                   |                                     |
| Лабораторні заняття                       |                                     |
| не передбачено навчальним планом          |                                     |
| Самостійна робота                         |                                     |
| 78 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 квантових генераторів випромінювання, особливості їх устрою, способи генерації випромінювання із заданими характеристиками (довжини хвиль, кількість мод, неперервний чи імпульсний режим генерації тощо).

вміти: застосовувати здобуті знання для коректного вибору джерел лазерного випромінювання в оптичних експериментах.

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 і 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. Квантова електроніка і фізика лазерів*

- Тема 1.* Вступ. Визначення квантової електроніки. Мазери і лазери. Історія створення лазерів і мазерів. Основні напрямки практичних застосувань лазерів. Системи передачі інформації. Концентрація світла у просторі і часі. Вплив лазерів на розвиток науки.
- Тема 2.* Основні відомості з теорії випромінювання атомів. Дворівнева система. Поглинання, спонтанне і вимушене випромінювання. Коефіцієнти Ейнштейна та ймовірності оптичних переходів. Дозволені, заборонені, безвипромінювальні переходи. Порівняння ймовірностей спонтанних і вимушених переходів.
- Тема 3.* Закон поглинання. Коефіцієнт поглинання для дворівневого переходу, зв'язок з населеністю і ймовірністю переходів. Інверсія населеності рівнів як необхідна умова підсилення світла. Від'ємний коефіцієнт поглинання, коефіцієнт підсилення, від'ємна абсолютна температура.
- Тема 4.* Основні причини розширення атомних рівнів. Природне розширення рівнів. Однорідне і неоднорідне розширення. Функції Лоренца і Гауса. Інтегральний коефіцієнт Ейнштейна. Переріз поглинання. Залежність коефіцієнта поглинання від частоти при дворівневому переході.
- Тема 5.* Дворівнева система. Неможливість отримання інверсії при стаціонарному збудженні. Ефекти потужності імпульсного збудження. Нелінійні ефекти насичення поглинання і підсилення. Залежність інтенсивності від координати при насиченні.
- Тема 6.* Квантові генератори і підсилювачі-мазери. Мазер на аміаку, реалізація інверсії, схема, принцип дії, характеристики. Трирівневі схеми реалізації інверсії в мазерах. Квантові парамагнітні підсилювачі. Приклад резонаторного підсилювача на кристалі рубіна.
- Тема 7.* Трирівнева і чотирирівнева схеми отримання інверсії в оптичному діапазоні. Основні властивості таких схем. Приклади активних середовищ (кристал

рубіна, неодимові середовища, суміш He-Ne). Схема самообмежених переходів для реалізації інверсії в імпульсних лазерах.

- Тема 8.** Класична схема лазера, її основні складові. Умова генерації світла в лазері. Роль насичення підсилення при стаціонарній генерації. Оптимальний коефіцієнт пропускання вихідного дзеркала. Опис втрат енергії за допомогою добротності. Добротність і роздільна здатність інтерферометра Фабрі–Перо.
- Тема 9.** Електромагнітні моди лазерного резонатора. Поздовжні і поперечні моди. Закритий і відкритий резонатори. Резонансні частоти поздовжніх і поперечних мод. Розповсюдження резонансних частот у спектрі. Роль дифракційних втрат у лазерному резонаторі, зв'язок коефіцієнта дифракційних втрат з числом Френеля. Резонатор лазера як інтерферометр Фабрі–Перо з великою базою.
- Тема 10.** Формування спектру випромінювання лазера. Роль ширини смуги підсилення, ширини мод і частотного інтервалу між ними. Головні причини звуження лінії генерації. Роль насичення підсилення у випадку однорідного і неоднорідного розширення смуг підсилення. Затягування резонансних частот.
- Тема 11.** Дифракційна теорія мод лазерного резонатора. Результат теорії Фокса–Лі. Просторовий розподіл поля у модах. Основні типи резонаторів. Стійкі і нестійкі резонатори. Конфокальний резонатор. Гаусові пучки, їх основні властивості.
- Тема 12.** Причина багатомодової генерації в лазерах. Частотне випалювання дірок у смугі підсилення. Просторове випалювання дірок модами в активному середовищі. Селекція поперечних мод, одномодова генерація. Селекція поздовжніх мод, одночастотна генерація. Основні методи селекції мод.
- Тема 13.** Безперервні та імпульсні лазери. Причини імпульсної генерації. Основні імпульсні режими. Вільна імпульсна генерація. Режими модуляції добротності і методи їх реалізації. Режими розвантаження резонатора. Режими синхронізації поздовжніх мод, методи реалізації.

### 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    |
| <b>Розділ 1. Квантова електроніка і фізика лазерів</b> |                 |              |    |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 1                                                 | 8               | 3            | 1  |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 2                                                 | 11              | 4            | 2  |      |      | 5     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 3                                                 | 9               | 3            | 2  |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 4                                                 | 11              | 4            | 2  |      |      | 5     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 5                                                 | 11              | 4            | 2  |      |      | 5     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 6                                                 | 10              | 4            | 2  |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 7                                                 | 9               | 3            | 2  |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 8                                                 | 10              | 3            | 2  |      |      | 5     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 9                                                 | 10              | 4            | 2  |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 10                                                | 11              | 4            | 2  |      |      | 5     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 11                                                | 11              | 4            | 2  |      |      | 5     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 12                                                | 10              | 4            | 2  |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 13                                                | 9               | 4            | 1  |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Разом за розділом 1                                    | 130             | 48           | 24 |      |      | 58    |              |              |    |      |      |       |
| <b>Курсова робота</b>                                  | 20              |              |    |      |      | 20    |              |              |    |      |      |       |
| <b>Усього годин</b>                                    | 150             | 48           | 24 |      |      | 78    |              |              |    |      |      |       |

#### 4. Теми семінарських занять

| № з/п | Теми                                                                                                                                   | Кільк. годин |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1     | Обчислення коефіцієнтів Ейнштейна та порівняння ймовірностей спонтанних і вимушених переходів                                          | 2            |
| 2     | Обчислення від'ємного коефіцієнту поглинання, коефіцієнту підсилення, від'ємної абсолютної температури при інверсії населеності рівнів | 3            |
| 3     | Порівняння значень однорідного і неоднорідного розширення рівнів з використанням функцій Лоренца і Гауса                               | 2            |
| 4     | Обчислення нелінійних ефектів насичення поглинання і підсилення                                                                        | 2            |
| 5     | Обчислення добротності й роздільної здатності еталона Фабрі–Перо.                                                                      | 2            |
| 6     | Обчислення резонансних частот поздовжних і поперечних мод лазерного резонатора                                                         | 3            |
| 7     | Обчислення кількості мод при лазерній генерації                                                                                        | 2            |
| 8     | Обчислення характеристик Гаусових пучків                                                                                               | 3            |
| 9     | Обчислення поперечних мод лазерного резонатора                                                                                         | 2            |
| 10    | Обчислення добротності лазерного резонатора                                                                                            | 3            |
|       | Разом                                                                                                                                  | 24           |

#### 5. Завдання для самостійної роботи

| № з/п | Види, зміст самостійної роботи                                                                                                | Кільк. годин |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1     | Ознайомитись із історією створення мазерів і лазерів                                                                          | 4            |
| 2     | Ознайомитись із методами обчислення ймовірностей переходів різних видів                                                       | 5            |
| 3     | Ознайомитись із формулами, що описують від'ємний коефіцієнт поглинання, коефіцієнт підсилення, від'ємну абсолютну температуру | 4            |
| 4     | Ознайомитись із формулами, які описують однорідне й неоднорідне розширення атомних ліній та частот переходів між ними         | 5            |
| 5     | Ознайомитись із нелінійними ефектами насичення поглинання і підсилення                                                        | 5            |
| 6     | Ознайомитись із трирівневою схемою реалізації інверсії в мазерах                                                              | 4            |
| 7     | Ознайомитись із трирівневою і чотирирівневою схемами отримання інверсії населеності в оптичному діапазоні                     | 4            |
| 8     | Ознайомитись із формулами, що описують добротність і роздільну здатність еталона Фабрі–Перо                                   | 5            |
| 9     | Ознайомитись із формулами для обчислення поздовжних і поперечних мод оптичного резонатора                                     | 4            |
| 10    | Ознайомитись із впливом ширини смуги підсилення активного середовища на характеристики лазерного випромінювання               | 5            |
| 11    | Ознайомитись із теоретичним описом стійких і нестійких резонаторів                                                            | 5            |
| 12    | Ознайомитись із явищем просторового випалювання дірок в активних середовищах                                                  | 4            |
| 13    | Ознайомитись із основними режимами імпульсної генерації лазерного випромінювання                                              | 4            |
| 14    | Індивідуальне завдання (курсова робота)                                                                                       | 20           |
|       | Разом                                                                                                                         | 78           |

## 6. Індивідуальні завдання

Курсова робота, яку студенти виконують на протязі семестру.

## 7. Методи навчання

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

## 8. Методи контролю

1. Поточний контроль при проведенні семінарських занять
2. Індивідуальне завдання: курсова робота
3. Екзамен

## 9. Схема нарахування балів

| Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання |                                         |       | Екзамен | Сума |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------|---------|------|
| Поточний контроль при проведенні семінарських занять         | Індивідуальне завдання (курсова робота) | Разом |         |      |
| 32                                                           | 28                                      | 60    | 40      | 100  |

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

60 балів протягом семестру – це 32 бали, що нараховуються при проведенні семінарських занять, та 28 балів за курсову роботу. Передбачається по 2 бали за кожну з 16 семінарських годин. Бали нараховуються при виконанні студентами поставленого завдання протягом заняття.

Курсова робота є індивідуальним завданням, яке студент виконує на протязі семестру і надає для оцінювання перед екзаменом. Курсові роботи оцінюються за шкалою 0–30 балів виходячи з їх відповідності завданням і повноти виконання.

Екзамен проводиться у письмовому вигляді шляхом написання студентами відповідей на поставлені запитання. Максимальною оцінкою за екзаменаційну роботу є 40 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. O. Svelto, “Principles of lasers”, 5th Edition, N.Y – London: Springer Science+Business Media, 2010, 620 p.
2. A. Yariv, “Quantum Electronics”, 3rd Edition, N.Y. – Singapore: John Wiley & Sons, 1989, 680 p.
3. J. T. Verdeyen, “Laser Electronics”, 3rd Edition, Englewood Cliffs, New Jersey 07632: Prentice Hall, 1995, 800 p.
4. В.П. Гаращук, «Основи фізики лазерів»: навч. посібник, К.: Пульсари, 2012, 344 с.
5. W. Demtröder, “Laser Spectroscopy: Basic Concepts and Instrumentation”, 3rd Edition, Berlin – Tokyo: Springer, 2003, 987 p.

### **Допоміжна література**

1. W. Demtröder, “Atoms, Molecules and Photons: An Introduction to Atomic-, Molecular- and Quantum Physics”, 2nd Edition, Heidelberg – N.Y.: Springer Science+Business Media, 2010, 589 p.
2. G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, “Introduction to Quantum Optics: from the Semi-classical Approach to Quantized Light”, Cambridge – Tokyo: Cambridge University Press, 2010, 665 p.