НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут фізики НАН України

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директором Інституту фізики НАН України, член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н.
_____ **М.В. Бондар**
(підпис)
«25» жовтня 2021 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ННД.06
Фізика лазерів та лазерна спектроскопія

для аспірантів

спеціальності: 104 Фізика і астрономія

третього (освітньо-наукового) рівня
вищої освіти – доктор філософії

Київ - 2021

Розробник:

с.н.с, член-кор. НАН України, завідувач відділу лазерної спектроскопії Інституту фізики НАНУ, доктор. фіз.-мат. наук. _____/А.М. Негрійко/

Робочу програму узгоджено науково-методичною радою

Протокол № 1 від 30.09 2021 р.

Головою науково-методичної ради _____/М.В. Бондар/

Робочу програму затверджено Вченою радою Інституті фізики НАНУ

Протокол № 10 від 21.10. 2021 р.

Голова Вченої ради _____/М.В. Бондар/

Робочу програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» 21.10. 2021 р.

Гарант освітньої програми _____/М.В. Бондар/

Пролонговано Вченою радою Інституту фізики НАН України:

навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІФ НАН України	підпис	№ протоколу	дата протоколу
20_____/20_____				
20_____/20_____				
20_____/20_____				
20_____/20_____				

.

1. Загальні відомості

Найменування показників	Характеристика дисципліни за денною формою навчання
Вид дисципліни	**вибіркова**
Мова викладання, навчання та оцінювання	**українська**
Загальний обсяг кредитів / годин	**4/120**
Курс	**2**
Семестр	**1**
Кількість змістових модулів з розподілом	**1**
Обсяг кредитів	**4**
Обсяг годин, В тому числі:	**120**
Лекції	**30**
Практичні заняття	**15**
Самостійна робота	**75**
Форма підсумкового контрою	**екзамен**

2. Мета, завдання та очікувані результати навчальної дисципліни

Робоча програма навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія» є нормативним документом, який розроблений на основі освітньо-наукової програми, далі ОП, (затверджена Вченою радою Інституту фізики НАН України, протоколом № від 20 року) підготовки здобувача третього рівня відповідно до навчального плану спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

Передумова вивчення. Навчальний курс ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія» є складовою циклу обов'язкової підготовки фахівців третього освітньо-кваліфікаційного рівня "доктор філософії". Програма курсу орієнтована на аспірантів, які самостійно або під керівництвом наукового керівника планують та здійснюють наукові дослідження відповідно до планів навчання у аспірантурі. Курс розроблений з орієнтацією як на аспірантів, які спеціалізуються у області лазерної фізики та лазерної спектроскопії, так і на слухачів, які спеціалізуються у інших напрямах фізики та астрономії.

Мета навчальної дисципліни. ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»: завершити формування у слухачів комплексу уявлень про основні засади фізики лазерів та лазерної спектроскопії, розширити світоглядний горизонт стосовно досягнень сучасної науки другої половини двадцятого та початку двадцять першого століття, отриманих у галузі фізики і техніки лазерів та їх застосувань, розвинути та закріпити компетенції щодо планування та здійснення оригінальних досліджень із застосуванням лазерів та лазерної спектроскопії для досягнення наукових результатів, які створюють нові знання у фізиці та/або астрономії.

Зміст навчальної дисципліни. Теоретичні та практичні знання, набуті при вивченні дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія», формування наукового світогляду, концептуальних та методологічних знань щодо історії розвитку та сучасного стану фізики лазерів та лазерної спектроскопії, ознайомлення з найвищими досягненнями світової науки, які базуються на використані лазерів та лазерної спектроскопії та відзначені Нобелівськими преміями, поглиблення знань з фізики лазерів та лазерної спектроскопії, закріплення фундаментальних понять, що лежать в основі сучасних методів лазерної техніки, лазерної спектроскопії та взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.

Предметом навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія» є гіпотези, теоретичні моделі та експериментальні результати у галузі фізики і техніки лазерів, лазерної спектроскопії, фізики взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, що лягли у основу видатних наукових досягнень, відзначених Нобелівськими преміями у другій половині XX та у XXI столітті – тобто після створення лазера.

Основними завданнями навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія» є формування у аспірантів системного розуміння дослідницького потенціалу лазерів та методів їх застосування, зокрема у спектроскопії, як сучасного інструмента наукових

досліджень, поглиблення, узагальнення та закріплення одержаних при вивченні навчальних спецкурсів на більш ранніх рівнях освітнього процесу знань у галузі фізики лазерів та лазерної спектроскопії, розвиток методичних засад навиків оцінки потенціалу отриманого наукового результату та його впливу на розвиток наукового напряму та науки в цілому.

Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь)

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен

Знати:

- основні характеристики лазера та лазерного випромінювання як інструмента наукових досліджень
- принципи керування параметрами лазерного випромінювання
- сучасні методи отримання гранично можливих параметрів лазерного випромінювання (когерентність, монохроматичність, потужність, енергія, тривалість лазерного імпульсу)
- основні методи лазерної спектроскопії, їх переваги і недоліки
- наукові досягнення у галузі фізики лазерів та їх застосувань, відзначені Нобелівською премією.

Уміти:

- визначити тип лазера, який забезпечує отримання когерентного випромінювання із заданими параметрами (спектральний діапазон, тривалість, енергія, потужність, інтенсивність випромінювання, якість лазерного пучка)
- здійснювати розрахунки характеристик лазерного випромінювання, необхідних для виконання експериментальних задач
- застосовувати сучасні експериментальні методики, що базуються на використанні лазерів та методів лазерної спектроскопії відповідно до теми наукової роботи
- формулювати вимоги до типу та конструкції джерела лазерного випромінювання, необхідного для виконання експериментальної задачі
- використовувати знання про досягнення, відзначені нобелівськими преміями при плануванні та здійсненні власних досліджень
- пояснити фізичний зміст відзначених нобелівськими преміями наукових результатів, які розглядаються при вивченні курсу та використовувати їх у науковій, викладацькій, популяризаторській діяльності

Завданням навчальної дисципліни (відповідно до переліку ОП) ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія» набути компетентносте:

Загальні: ЗК1,ЗК2, ЗК3, ЗК4, ЗК5, ЗК6, ЗК7, ЗК8.

Фахові: ФК1, ФК2, ФК3, ФК6

Програмні результати навчання ПРН2, ПРН3, ПРН4, ПРН5, ПРН6, ПРН7, ПРН8, ПРН9, ПРН10, ПРН11, ПРН12, ПРН13, ПРН14.

3. Тематичний план

(структура залікового кредиту)
з навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»
(2 курс – 1 семестр)

№	Зміст	Лекції, год.	Практичні, год	Самостійна робота, год	Всього, Год.
1	Винахід лазера і мазера. Підсилення світла шляхом вимушеного випромінювання в активному середовищі, інверсія населеності, відкритий оптичний резонатор. Когерентність лазерного випромінювання. Нобелівська премія 1964 року	3	0	7	10
2	Напівпровідникові лазери. Гетероструктури. Передача світла по оптичних волокнах для оптичних комунікацій. Фізика оптичного волокна. Оптоволоконні комунікації. Нобелівські премії 2000 р. та 2009 р., Нобелівська лекція 1964 р.	3	3	7	13
3	Лазерні джерела еталонних частот і довжин хвиль. Оптичний годиник. Квантові оптичні резонанси. Джерела світла для спектроскопії надвисокої роздільної здатності. Нобелівська премія 2005 року.	3	0	8	11
4	Фемтосекундні лазери. Техніка генерації над коротких імпульсів. Синхронізація мод. Нобелівська премія з хімії 1999 р.- вивчення хімічних реакцій методами фемтосекундної спектроскопії	3	0	7	10
5	Лазери надвисокої інтенсивності. Чирп оптичних частот. Підсилення ультракоротких інтенсивних імпульсів. Нобелівська премія 2018 р. – генерація високо інтенсивних ультракоротких імпульсів.	3	3	7	13
6	Субдоплерівська спектроскопія.	3	3	8	14

	Спектроскопія насиченого поглинання. Двофотонна бездоплерівська спектроскопія. Селективне збудження атомних рівнів. Нобелівська премія 1981 р.				
7	Нелінійна оптика. Речовина у сильних світлових полях. Генерація оптичних гармонік. Самофокусування світла. Нелінійна лазерна спектроскопія. Спектроскопія чотири хвильового змішування. Спектроскопія CARS Нобелівська премія 1981 року.	3	3	8	14
8	Атомні стандарти частоти. Оптична накачка. Рубідієвий стандарт частоти. Водневий мазер. Резонанси в рознесених полях. Цезієвий атомний годинник. Нобелівська премія 1966 р. та 1989 р.	3	0	8	11
9	Проблема вимірювання оптичних частот. Гетеродинний метод. Биття оптичних частот. Оптичний суперконтиніум. Частотна гребінка. Лазери у метрології часу і частот. Нобелівська премія 2005 р.	3	3	8	14
10	Вимірювання та маніпулювання одиничними квантовими системами. Іони в пастці. Одиничні фотони в резонаторі. Неруйнівні вимірювання квантового стану фотона. Нобелівська премія 1989 р. та 2012 р.	3	0	7	10
Всього за курс		**20**	**30**	**15**	**75**

Методичне забезпечення навчальної дисципліни забезпечують:
опорні конспекти лекцій, бібліотечні посібники зі списку рекомендованої літератури, електронні посібники, мультимедійні презентації, діючі нормативно-правові законодавчі акти України, довідково-інформаційні інтернет-джерела тощо.

4. ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»

1. **Тема 1.** Винахід лазера і мазера. Історія розвитку основних принципів фізики лазера і мазера. Підсилення світла шляхом вимушеного випромінювання в активному середовищі, Інверсія

населеності, накачка активного середовища. Балансні рівняння. Відкритий оптичний резонатор. Моди резонатора. Селекція мод. Когерентність лазерного випромінювання. Формула Шавлова-Таунса. Ширина лазерної лінії. Нобелівська премія 1964 року – М.Г. Басов, О.М. Прохоров, Ч. Таунс – «за фундаментальні роботи в області квантової електроніки, що призвели до створення генераторів та підсилювачів на лазерно-мазерному принципі»
Література: 1 – премія 1964 р; 2-4, 9, 15.
Завдання для самостійної роботи (7 год.)
1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Типи лазерів за характеристиками активного середовища. Поперечні та поздовжні моди оптичного резонатора. Типи оптичних резонаторів. Стійкі резонатори. Способи селекції мод. Гасові пучки, їх характеристики. Розв'язування задач за темою лекції.

2. **Тема 2.** Напівпровідникові лазери. Інверсія населеності у напівпровідникових лазерах. Типи резонаторів напівпровідникових лазерів. Гетероструктури, їх роль у формуванні активного середовища напівпровідникового лазера. Характеристики сучасних напівпровідникових лазерів. Наіпровідникові лазери у оптичних комунікаціях. Передача світла по оптичних волокнах для оптичних комунікацій. Фізика оптичного волокна. Оптоволоконні комунікації. Нобелівські премії 2000 р.: Ж. Алфьоров та Г. Крьомер «за розробку напівпровідникових гетеро структур, що застосовуються у швидкісній та оптоелектроніці» та 2009 р.: Ч. Као «за проривні досягнення стосовно пропускання світла волокнами для оптичних комунікацій Нобелівська лекція М.Г. Басова 1964 р. «Напівпровідникові лазери»;
Література: 1- премії 2000 р. та 2009, лекція М.Г. Басова 1964 р; 2-4, 16, 17.
Завдання для самостійної роботи (7 год.)
1. Вивчення матеріалу лекції
2. Опрацювання матеріалу, що винесений для самостійного розв'язку:
Спектральні та часові характеристики генерації напівпровідникових лазерів. Селекція мод, зовнішні резонатори. Резонатор Літрова та резонатор Літтмана-Меткалфа. Твердотільні лазери з діодною накачкою. Оптоволоконні лінії передачі даних, їх характеристики. Групова швидкість світла у оптоволокні, дисперсія групової швидкості. Розв'язування задач за темою лекції.

3. Тема 3. Означення метра. Методи відтворення одиниці довжини СІ. Оптичний годинник. Лазерні джерела еталонних частот і довжин хвиль. Квантові оптичні резонанси. Стабілізовані за резонансами насиченого поглинання та насиченої дисперсії лазери. Холодні атоми та іони як репери для стабілізації частот. Лазери зі стабілізацією частоти як джерела світла для спектроскопії надвисокої роздільної здатності та метрології.. Нобелівська премія 2005 року: Дж. Холл, Т. Хенш «за внесок у розробку лазерної прецизійної спектроскопії, включаючи техніку оптичного частотного гребеня».
Література: 11 – премія 2005 р.; 2 -7, 11-13, 16, 17.
Завдання для самостійної роботи (8 год.)
1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Праці українських вчених у галузі високо стабільних за частотою лазерів, типи лазерів для відтворення еталонних довжин хвиль. Методи стабілізації частоти лазера, характеристики сучасних джерел еталонних довжин хвиль. Розв'язування задач за темою лекції.

4. Тема 4. Ознайомлення з фемтосекундним комплексои Інституту фізики НАНУ. Фемтосекундні лазери. Техніка генерації надкоротких імпульсів. Синхронізація мод. Зв'язок тривалості імпульса та ширини лінії підсилення лазера. Активні середовища фемтосекундних лазерів. Спектр випромінювання фемтосекундного лазера. Техніка вимірювання тривалості фемтосекундних імпульсів, оптичний корелятор. Метод pump – probe. Нобелівська премія з хімії 1999 р.: Ахмед Зевал «за його дослідження перехідних станів хімічних реакцій з використанням фемтосекундної спектроскопії»
Література: https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1999/summary/, 2-4.

Завдання для самостійної роботи (7 год.)
1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Оптичні схеми фемтосекундних лазерів. Пасивна і активна синхронізація мод. Керування тривалістю імпульсів у фемтосекундних лазерах. Техніка фемтосекундної спектроскопії. Розв'язування задач за темою лекції.

5. Тема 5. Лазери надвисокої інтенсивності. Проблема підсилення коротких потужних оптичних імпульсів. Дисперсія групової швидкості та її роль у генерації над коротких світлових імпульсів. Чирп оптичних частот у фемтосекундному лазері. Техніка «стискання (compressing)» і «розтягування (stretching)» надкоротких світлових імпульсів. Підсилення ультракоротких інтенсивних імпульсів. Нобелівська премія 2018 р. Жерар Муру, Донна Стрікленд –«за їх метод генерації високо інтенсивних ультракоротких оптичних імпульсів»
Література: 1 – премія 2018; 2 -4.
Завдання для самостійної роботи (7 год.)
1. Вивчення матеріалу лекції
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Піонерські роботи Роботи Ж. Муру та Д. Стрікленд щодо розробки методу підсилення ультракоротких потужних лазерних імпульсів. Аналоги методу у галузі радіолокації. Перспективи застосування ультракоротких інтенсивних лазерних імпульсів у фізиці і біології. Розв'язування задач за темою лекції.

6. Тема 6. Субдоплерівська спектроскопія. Ознайомлення з експериментальними установками за темою лекції (ІФ НАНУ). Насичення поглинання. Насичення однорідної та неоднорідної лінії поглинання. Провали Беннета та провал Лемба. Спектроскопія насиченого поглинання. Поляризаційна та багатофотонна спектроскопія. Двофотонна бездоплерівська спектроскопія. Селективне збудження атомних рівнів. Нобелівська премія 1981 р.: Н. Бломберген, А. Шавлов «за їхній внесок у розвиток лазерної спектроскопії»
Література: 1 – премія 1981 р.; 5-7, 13,14.
Завдання для самостійної роботи (8 год.)
1. Вивчення матеріалу практичного заняття.
2. Експериментальні схеми лазерних спектрометрів насиченого поглинання. Спектроскопія насиченого поглинання молекулярного йоду. Вплив ізотопного складу молекули. Роздільна здатність методу, фактори, що впливають на роздільну здатність. Розв'язування задач за темою лекції.

7. Тема 7. Нелінійна оптика. Ознайомлення з експериментальними установками за темою лекції (ІФ НАНУ). Оптичне середовище у сильних світлових полях. Поляризація середовища у сильних лазерних полях. Нелінійна сприйнятливість середовища. Механізми нелінійності. Тензор нелінійної сприйнятливості. Генерація оптичних гармонік. Параметричні процеси. Самофокусування світла. Спектроскопія чотири хвильового змішування. Раманівська спектроскопія. Спектроскопія CARS. Роботи українських вчених у галузі нелінійної оптики. Нобелівська премія 1981 року: Н. Бломберген, А. Шавлов «за їхній внесок у розвиток лазерної спектроскопії»
Література: 1 – премія 1981 р.; 2-4, 9, 16, 17, 19.
Завдання для самостійної роботи (8 год.)
1. Вивчення матеріалу **практичного заняття**.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після практичного заняття:
Nd:YAG лазер. Модуляція добротності. Генерація імпульсів наносекундної тривалості. Генерація другої гармоніки Nd:YAG лазера. Умови оптичного синхронізму. Нелінійнооптичні кристали, їх характеристики. Періодично поляризовані матеріали, їх використання у генерації гармоніки. Розв'язування задач за темою лекції.

8. Тема 8. Атомні стандарти частоти. Історія розвитку. Секунда СІ. Надтонка структура основного стану атома цезію. Цезієвий атомний годинник. Резонанси в рознесених полях. Атомний

фонтан. Радіооптичний резонанс. Оптична накачка атомів. Оптична орієнтація атомів. Рубідієвий стандарт частоти. Експериментальна схема ізотопічно селективного збудження атомних станів рубідію. Водневий мазер. Служба часу України. Нобелівська премія 1966 р.: А. Кастлер «за відкриття і розвиток оптичних методів для вивчення Герцевих резонансів у атомах» та 1989 р.: Н. Рамсі «за винахід методу рознесених осциляторних полів та його використання у водневому мазері та інших атомних годинниках»

Література: 1 – премія 1966 та 1989 рр.; 5-7, 11, 17.

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу практичного заняття.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після практичного заняття:

Атомні годинники, їх типи та застосування. Оптичні атомні годинники. Лазерні джерела еталонних частот. Розв'язування задач за темою лекції.

9. Тема 9. Проблема вимірювання оптичних частот. Перші системи вимірювання оптичних частот, радіооптичний міст. Гетеродинний метод. Биття оптичних частот. Спектр випромінювання лазера з синхронізованими модами. Спектр фемтосекундного лазера. Оптичний суперконтиніум. Генерація оптичного суперконтиніуму у оптичних волокнах типу фотонного кристала. Частотна гребінка. Пряме вимірювання частоти випромінювання лазера. Лазери у метрології часу і частоти. Нобелівська премія 2005 р.: Дж. Холл, Т. Хенш «за внесок у розробку лазерної прецизійної спектроскопії, включаючи техніку оптичного частотного гребеня».

Література: 1 – премія 2005 р.; 5, 20, 21.

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Методи оптичного гетеродинування у обробці оптичних сигналів. Теоретичні моделі механізмів генерації оптичного суперконтиніуму. Експериментальна схема вимірювання частоти лазерного випромінювання з використанням частотного гребеня. Проблема фази несучої частоти та метод її розв'язання. Розв'язування задач за темою лекції.

10. Тема 10. Вимірювання та маніпулювання одиничними квантовими системами. Іони та атоми в пастці. Схеми пасток для іонів та атомів. Одиничні фотони в резонаторі. Добротність резонатора. Неруйнівні вимірювання квантового стану фотона. Рідберговський атом та його застосування у детектуванні квантового стану оптичного поля. Нобелівська премія 1989 р.: Х. Демельт та В. Пауль «за розробку техніки пастки іонів» та 2012 р.: С. Арош та Д. Вайнленд « за проривні експериментальні методи, що дозволяють вимірювати і маніпулювати індивідуальними квантовими системами»

Література: 1- премії 1989 та 2012 р.; 5,6,8, 10, 12.

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Проблема вимірювання у квантовій механіці. Неруйнівні вимірювання – вимірювання, що не руйнують квантовий стан системи. Маніпулювання окремими фотонами та атомами. Розв'язування задач за темою лекції.

5. Практичні заняття

з навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»

Практичне закріплення лекційного матеріалу та наукові доповіді аспіранта пов'язані з темами лекцій і є частиною змісту дисципліни.

6 Самостійна робота

з навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»

№	Зміст самостійної роботи аспірантів	Обсяг, годин
1.	Вивчення матеріалу лекції	30
2.	Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення	45
Усього за навчальну дисципліну		75

7. Методи викладання

з навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»

У процесі викладання дисципліни використовуються такі методи:
1) методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності (бесіда, лекція; ілюстрація; лабораторні роботи, реферати; самостійна робота студентів);
2) методи стимулювання й мотивації навчально-пізнавальної діяльності (навчальні дискусії, модульно-рейтингова система знань);
3) методи контролю (самоконтролю, взаємоконтролю), корекції (самокорекції, взаємокорекції) за ефективністю навчально-пізнавальної діяльності.

8. Рейтингова система оцінювання

з навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»

Основними формами організації контролю у процесі вивчення студентами даної дисципліни є індивідуальна, групова та фронтальна перевірка знань, вмінь та навичок студентів (усна та письмова). Рейтинг аспіранта складається з наступних отриманих балів:

1. Експрес-контроль – 20 балів. (усне опитування чи самостійні роботи під час навчального процесу)
2. Практичні заняття та самостійна робота – 40 балів.
3. Екзамен – 40 балів.

Заохочувальні та штрафні бали

1. При відсутності на лекції/практичному занятті без поважних причин -2 бали
2. Подана в журнал стаття чи виступ на конференції за темою курсу +10 балів.

Сума як штрафних так і заохочуваних балів розраховується за формулою 0,1R, де R – загальна кількість балів, і не має перевищувати в цілому 10 балів.

Шкала рейтингів.

Загальна кількість балів, яку аспіранта може отримати під час вивчення курсу складається із суми вагових балів отриманих протягом вивчення дисципліни

$$R=20+40+40=100 \text{ (балів)}$$

Шкала відповідності оцінок

Рейтингова оцінка	Значення оцінки	Рейтинг у відсотках, %
A	**Відмінно** – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з, можливими незначними недоліками.	90-100
B	**Дуже добре** – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.	82-89
C	**Добре –** добрий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з незначною кількість помилок.	75-81
D	**Задовільно –** посередні рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу із значною кількістю недоліків, достатній для подальшого навчання або ж професійної діяльності.	69-74
E	**Достатньо -** мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу.	60-100
FX	Незадовільно з можливістю повторного складання – незадовільний рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з можливістю повторного перескладання після самостійного доопрацювання.	35-59
F	Незадовільно з з обов'язковим повторним вивченням курсу – низький рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу, що вимагає повторного вивчення матеріалів курсу.	1-34

9. Орієнтовний перелік екзаменаційних питань

з навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»

2. Винахід лазера і мазера. Підсилення світла шляхом вимушеного випромінювання в активному середовищі. Інверсія населеності, накачка активного середовища. Відкритий оптичний резонатор. Когерентність лазерного випромінювання. Нобелівська премія 1964 року – М.Г. Басов, О.М. Прохоров, Ч. Таунс
3. Напівпровідникові лазери. Інверсія населеності у напівпровідникових лазерах. Гетероструктури, їх роль у формуванні активного середовища напівпровідникового лазера. Характеристики сучасних напівпровідникових лазерів. Нобелівська премія 2000 р.: Ж. Алфьоров та Г. Крьомер Нобелівська лекція М.Г. Басова 1964 р. «Напівпровідникові лазери»;
4. Лазерні джерела еталонних частот і довжин хвиль. Квантові оптичні резонанси. Стабілізовані за резонансами насиченого поглинання та насиченої дисперсії лазери. Лазери зі стабілізацією частоти як джерела світла для спектроскопії надвисокої роздільної здатності та метрології. Нобелівська премія 2005 року: Дж. Холл, Т. Хенш
5. Фемтосекундні лазери. Техніка генерації надкоротких імпульсів. Синхронізація мод. Зв'язок тривалості імпульса та ширини лінії підсилення лазера. Активні середовища фемтосекундних лазерів. Спектр випромінювання фемтосекундного лазера. Техніка

вимірювання тривалості фемтосекундних імпульсів, оптичний корелятор. Нобелівська премія з хімії 1999 р.: Ахмед Зевал

6. Лазери надвисокої інтенсивності. Проблема підсилення коротких потужних оптичних імпульсів. Дисперсія групової швидкості та її роль у генерації надкоротких світлових імпульсів. Чирп оптичних частот у фемтосекундному лазері. Техніка «стискання (compressing)» і «розтягування (stretching)» надкоротких світлових імпульсів. Підсилення ультракоротких інтенсивних імпульсів. Нобелівська премія 2018 р. Жерар Муру, Донна Стрікленд
7. Субдоплерівська спектроскопія. Насичення поглинання. Насичення однорідної та неоднорідної лінії поглинання. Провали Беннета та провал Лемба. Спектроскопія насиченого поглинання. Нобелівська премія 1981 р.: Н. Бломберген, А. Шавлов

8. Нелінійна оптика. Оптичне середовище у сильних світлових полях. Поляризація середовища у сильних лазерних полях. Нелінійна сприйнятливість середовища. Механізми нелінійності. Тензор нелінійної сприйнятливості. Генерація оптичних гармонік. Параметричні процеси. Самофокусування світла. Нобелівська премія 1981 року: Н. Бломберген, А. Шавлов «за їхній внесок у розвиток лазерної спектроскопії»

9. Атомні стандарти частоти. Надтонка структура основного стану атома цезію. Цезієвий атомний годинник. Резонанси в рознесених полях. Атомний фонтан. Радіооптичний резонанс. Оптична накачка атомів. Нобелівська премія 1966 р.: А. Кастлер та 1989 р.: Н. Рамсі

Література: 1 – премія 1966 та 1989 рр.; 5-7, 11, 17.

10. Проблема вимірювання оптичних частот. Перші системи вимірювання оптичних частот, радіооптичний міст. Гетеродинний метод. Спектр випромінювання лазера з синхронізованими модами. Спектр фемтосекундного лазера. Оптичний суперконтиніум. Пряме вимірювання частоти випромінювання лазера. Лазери у метрології часу і частоти. Нобелівська премія 2005 р.: Дж. Холл, Т. Хенш
11. Вимірювання та маніпулювання одиничними квантовими системами. Іони та атоми в пастці. Схеми пасток для іонів та атомів. Одиничні фотони в резонаторі. Добротність резонатора. Неруйнівні вимірювання квантового стану фотона. Рідберговський атом та його застосування у детектуванні квантового стану оптичного поля. Нобелівська премія 1989 р.: Х. Демельт та В. Пауль та 2012 р.: С. Арош та Д. Вайнленд
12. Голографія. Когерентність світла. Часова і просторова когерентність. Когерентність лазерного випромінювання. Лазерні джерела когерентного випромінювання. Матеріали для

запису голограм. Методи голографії: метод Габора, Лейта-Упатнієкса, Денисюка. Українські вчені у розробці та вивченні голографічних методів і технологій. Нобелівська премія 1971 р.: Д. Габор

13. Утримання і охолодження атомів лазерним світломЗакони збереження при взаємодії атома зі світлом. Передача механічного імпульсу фотонів атомам. Світловий тиск на атоми. Спонтанний та вимушений світловий тиск на атоми та молекули. Роботи українських вчених у дослідження тиску світла на атоми. Нобелівська премія 1997 р.: С. Чу, К. Коен-Танноуджі, В. Філліпс та 2001 р.: Е. Корнел, В. Кетерле, К. Віман

13. Лазерні детектори малих і надмалих переміщень. Техніка лазерів з гранично високою монохроматичністю та стабільністю частоти випромінювання. Варіація Аллана. Лазерні інтерферометри з великою базою. Лазерна інтерферометрична обсерваторія гравітаційних хвиль LIGO. Нобелівська премія 2017 р.: Р. Вайс, Б. Баріш, К. Торн

14. Фундаментальне обмеження роздільної здатності мікроскопа, дифракційна границя Аббе, критерій Релея. Стимульоване погашення флуоресценції. Оптичне розділення, не обмежене дифракційною межею. Техніка супер-роздільної мікроскопії. Наномікроскопія. Нобелівська премія з хімії 2014 р.: Е. Бетціг, С. Хелл, В. Морнер

15.Оптичний пінцет. Тиск плоскої хвилі світла. Розсіювання, поглинання, заломлення світла сферичною прозорою часткою. Тиск світла на малі частки у сфокусованих лазерних пучках. Градієнтна сила світлового тиску. Левітація часток у світловому полі. Маніпулювання вірусами та живими клітинами. Нобелівська премія 2018 р.: А. Ашкін

10.Рекомендована література

з навчальної дисципліни ННД.06 «Фізика лазерів та лазерна спектроскопія»

Основна:

1. Нобелівські лекції лауреатів, офіційна інформація Шведської королівської академії наук про присудження премії відповідних років. https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics.
2. Milonni, Peter W. Laser physics / Peter W. Milonni, Joseph H. Eberly
3. Звелто О. Принципы лазеров / Пер. под науч. ред. Т. А . Шмаонова. 4-е изд. — СПб.: Издательство «Лань», 2008. — 720 с.
   Orazio Svelto. Principles of Lasers/ 5-th edition, Polytechnic Institute of Milan and National Research Council Milan, Italy. Translated from Italian and edited by David C. Hanna, Southampton University Southampton, England, 2010 620 pages
4. Н.В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. М., «Наука» 1988.
5. Демтрёдер В. Современная лазерная спектроскопия. Пер. с англ. Учебное пособие. Изд. Дом Интелле Догопрудный, 2014 – 1072 с.

   (Demtröder, W., Laser spectroscopy: basic concepts and instrumentation /Wolfgang Demtröder. - 2nd ed. p. cm. Includes bibliographical references and index. 1. Laser spectrocopy. I.)
6. В.Г. Миногин, В.С. Летохов, *Давление лазерного излучения на атомы* (Москва: Физматгиз, 1986) 222 с.

(V.G. Minogin, V.S. Letokhov, *Laser Light Pressure on Atoms* (New York: Gordon and Breach, 1987) 248 pp., ISBN 2-88124-080-1. (перевод с русского издания))

7. В.С. Летохов, В.П. Чеботаев., Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения (Москва: Наука. 1990), 512 с.
   В.С. Летохов, В.П. Чеботаев, Принципы нелинейной лазерной спектроскопии (М.: Наука, 1975), 279 с.
8. Harold J. Metcalf, Peter van der Straten. Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9783527600441.oe005

Додаткова:

9. Д.Н. Клышко, Физические основы квантовой электроники. Учеб. Руководство. М., Наука, 1986 – 296 с.
10. Негрійко А.М., Романенко В.І., Яценко Л.П. Динаміка атомів і молекул в когерентних лазерних полях. Київ, Наукова думка, 2008 – 240 с.
11. Мачехин Ю.П., Негрийко А.М., Яценко Л.П. Оптические стандарты частоты. Части 1- 3. Харьков.
12. Павлик Б.Д. Холодні та ультрахолодні атоми (рос.). Київ, Наукова думка, 1990 – 266 с.
13. М.В. Данилейко, Л.П. Яценко. Резонансні явища в кільцевих газових лазерах (рос.) . Киев, Наукова думка, 1994. – 131с .
14. С.Ф. Лукьяненко, М.М. Макогон, Л.Н. Синица. Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия. Основы метода и применения. Новосибирск: Наука, 1985 – 120 с.
15. С. П. Анохов, Т. Я. Марусий, М. С. Соскин. Перестраиваемые лазеры. – М.: Радио и связь, 1982