

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

“ 28 ” червня 2023 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

«КВАНТОВА МЕТРОЛОГІЯ»

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

галузь знань 10 природничі науки

(шифр і назва)

спеціальність 105 прикладна фізика та наноматеріали

(шифр і назва)

освітня програма радіофізика, біофізика та комп'ютерні системи

(шифр і назва)

спеціалізація _____

(шифр і назва)

вид дисципліни за вибором

(обов'язкова / за вибором)

факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

2023 / 2024 навчальний рік

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

Протокол № 6 від “ 28 ” червня 2023 року

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: Дегтярьов Андрій Вікторович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри квантової радіофізики.

Програму схвалено на засіданні кафедри квантової радіофізики

Протокол від “ 28 ” червня 2023 року № 8

Завідувач кафедри квантової радіофізики



(підпис)

Вячеслав МАСЛОВ

(прізвище та ініціали)

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

Гарант освітньої (професійної/наукової) програми
(керівник проектної групи) Олександр БУТРИМ



(підпис)

Олександр БУТРИМ

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією
факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Протокол від “ 28 ” червня 2023 року № 6

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



(підпис)

Олександр БУТРИМ

(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “ Квантова метрологія ” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки

бакалавр

(назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня)

спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали

освітня програма Радіофізика і електроніка та біофізика

спеціалізації _____

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни полягає в оволодінні використання квантових методів у реальній метрологічній і виробничій практиці, а також їх застосування у термометрії і фотометрії; ознайомлення з новими тенденціями розвитку у сучасній квантовій метрології.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є надання студентам необхідних знань та навички постановки та вирішення завдань наукових досліджень у галузі сучасної квантової метрології за допомогою сучасних методів та засобів теоретичних та експериментальних досліджень

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності. (ЗК-1)
- Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями. (ЗК-5)
- Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел. (ЗК-6)
- Навики здійснення безпечної діяльності. (ЗК-10)
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. (ЗК-11)
- Здатність виконувати аналіз спеціальної літератури, формулювати постановку наукової або науково-технічної задачі, обирати методи та методики, складати програми наукових досліджень та науково-технічних розробок у галузі прикладної фізики та наноматеріалів. (ФК-1)
- Здатність відповідно до поставленої задачі виконувати науково-технічні розробки в галузі прикладної фізики та наноматеріалів. (ФК-4)
- Здатність самостійно опановувати нову апаратуру та технології, в тому числі із суміжних галузей, для розв’язання виробничих задач. (ФК-5)

1.3. Кількість кредитів – 6

1.4. Загальна кількість годин – 180

Заняття проводяться у малочисельній групі.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
Нормативна / за вибором
Денна форма навчання Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки
4-й
Семестр
8-й
Лекції
45

Практичні, семінарські заняття
30
Лабораторні заняття
–
Самостійна робота
105 год.
Індивідуальні завдання
–
Контрольні роботи – 2

1.6. Заплановані результати навчання – студенти повинні знати: методи та способи постановки та вирішення завдань фізичних досліджень у галузі сучасної квантової метрології; принципи дії, функціональні та метрологічні можливості сучасної апаратури для фізичних досліджень у галузі квантової метрології; вміти: самостійно ставити та вирішувати конкретні фізичні завдання наукових досліджень у галузі квантової метрології з використанням сучасної апаратури та комп'ютерних технологій.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Використовувати знання в галузі прикладної фізики, математики, електроніки та інформаційних технологій для виконання наукових досліджень та розв'язання виробничих задач. (ПРН-1)
- Знаходити та аналізувати наукову та науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики та наноматеріалів із вітчизняних та зарубіжних джерел, в тому числі з використанням сучасних пошукових систем. (ПРН-2)
- Обговорювати та знаходити прогресивні та інноваційні рішення проблем і завдань при виконанні науково-технічних та виробничих проектів. (ПРН-3)
- Коректно формулювати професійні висновки, апробувати їх та доносити до аудиторії різного фахового рівня, використовуючи сучасні методики наукової та технічної комунікації українською та іноземними мовами. (ПРН-6)

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Фізичні ефекти і квантова метрологія.

Тема 1. Вступ. Методологічні питання квантової метрології.

Мета та завдання курсу лекцій. Основні поняття і терміни. Елементи сучасної фізичної картини світу і квантова метрологія. Фізичні ефекти, що використовуються у квантовій метрології.

Тема 2. Секунда: від «астрономічної» до «квантової» секунди.

Фізичні основи квантових стандартів частоти. Молекулярний і рубідієвий стандарти часу-частоти. Квантовий стандарт частоти на цезії. Квантовий стандарт частоти на атомах водню. Первинні еталони одиниць часу і частоти та перспективи їх розвитку.

Тема 3. Метр. Від артефакту до «світлового» метра.

Лазер і «світловий» метр. Первинний еталон метра. Первинний еталон одиниці довжини України.

Тема 4. Ефект Джозефсона і електричні вимірювання.

Фізичні основи ефекту Джозефсона. Апаратура для відтворення напруги постійного струму на основі ефекту Джозефсона. Застосування ефекту Джозефсона у промисловості і приладобудуванні.

Тема 5. Квантовий ефект Холла і вимірювання параметрів електричних кіл.

Фізичні основи квантового ефекту Холла. Міра електричного опору на квантовому ефекті Холла. Первинний еталон одиниці електричного опору України. Перспектива розвитку – квантовий ефект Холла на графені.

Тема 6. Ефект ядерного магнітного резонансу і електромагнітні вимірювання.

Фізичні основи ефекту ЯМР. Коротка історія застосування ефекту ЯМР у метрології. ЯМР і еталони одиниці магнітної індукції. ЯМР і магнітні вимірювання.

Тема 7. Квантові ефекти і нова система електричних еталонів.

Відтворення ампера на основі квантових ефектів. Квантові ефекти і вимірювання параметрів інтенсивності. Еталони змінної напруги і змінного струму. Еталони одиниці потужності ВЧ і НВЧ- діапазонів.

Тема 8. Квантова метрологія і природний еталон маси.

Історія визначення кілограма. Типова структура еталона кілограма і еталон України. Методи відтворення природного кілограма. Умови, які необхідно виконати для перевизначення кілограма. Одиниця кількості речовини – моль і стала Авогадро.

Тема 9. Світлові вимірювання: від свічки до квантових технологій.

Із історії світлових (фотометричних) еталонів. Еталони одиниці сили світла на основі приймача. Первинний еталон України одиниці сили світла – кандели. Відтворення одиниці світлового потоку – люмена, еталон України. Перспективи квантового перевизначення світлових одиниць.

Тема 10. Нова версія системи SI (New SI).

Перевизначення одиниць і нова SI. Аналіз запропонованих визначень основних одиниць. Наслідки впровадження нової SI.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
		л	п	лаб.	інд.	с. р.		л	п	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Фізичні ефекти і квантова метрологія.												
Тема 1. Вступ. Методологічні питання квантової метрології.	14	4				10						
Тема 2. Секунда: від «астрономічної» до «квантової» секунди.	17	4	2			11						
Тема 3. Метр. Від артефакту до «світлового» метра.	16	4	4			12						
Тема 4. Ефект Джозефсона і електричні вимірювання.	20	6	4			12						

Тема 5. Квантовий ефект Холла і вимірювання параметрів електричних кіл.	16	4	2			10					
Тема 6. Ефект ядерного магнітного резонансу і електромагнітні вимірювання.	16	4	2			10					
Тема 7. Квантові ефекти і нова система електричних еталонів.	18	4	4			10					
Тема 8. Квантова метрологія і природний еталон маси.	18	4	4			10					
Тема 9. Світлові вимірювання: від свічки до квантових технологій	20	6	4			10					
Тема 10. Нова версія системи SI (New SI).	19	5	4			10					
Разом за розділом 1	180	45	30			105					
<i>Усього годин</i>	180	45	30			105					

4. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Фізичні основи квантових стандартів частоти.	2
2	Система передачі розміру одиниці мірам довжини.	4
3	Квантовий вольтметр.	4
4	Відтворення одиниць активного опору і індуктивності за допомогою розрахункового конденсатора.	2
5	ЯМР і магнітні вимірювання.	2
6	Квантові ефекти і вимірювання параметрів інтенсивності.	4
7	Забезпечення неперервності вимірювань маси і пов'язаних з нею величин.	4
8	Приймач на основі фотодетектора.	4
9	Семінар “ Наслідки впровадження нової SI”.	4
Усього годин		30

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи: робота з літературою, підготовка до виконання практичних і лабораторних занять	Кількість годин
1	Розділ 1. Тема 1. Фундаментальні фізичні сталі.	10
2	Розділ 1. Тема 2. Квантовий стандарт частоти на атомах водню.	11
3	Розділ 1. Тема 3. Система вимірювання частоти лазера.	12

4	Розділ 1. Тема 4. Застосування ефекту Джоузефсона у промисловості і приладобудуванні.	12
5	Розділ 1. Тема 5. Структурна схема еталона електричного опору на квантовому ефекті Холла.	10
6	Розділ 1. Тема 6. Історія застосування ефекту ЯМР у метрології.	10
7	Розділ 1. Тема 7. Відтворення ампера на основі квантових ефектів.	10
8	Розділ 1. Тема 8. Передумови і суть перевизначення моля.	10
9	Розділ 1. Тема 9. Первинний еталон України одиниці сили світла – кандели.	10
10	Розділ 2. Тема 10. Перевизначення одиниць і нова SI.	10
Усього годин		105

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. На самостійну роботу виведено низку питань, що стосуються змісту курсу, що вивчається, але не входять до лекцій та практичної роботи.

8. Методи контролю

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

Після закінчення тем № 4 та № 8 курсу проводиться письмова контрольна робота, яка оцінюється у 20 балів кожна.

Підсумковий контроль – екзамен (40 балів).

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль та самостійна робота											Екз.	Сума		
Розділ 1											Разом			
T1	T2	T3	T4	КР	T5	T6	T7	T8	КР	T9				T10
2	2	2	2			2	2	2		2				
8				20	8				20	4		60	40	100

T1, T2,... – номер теми.

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 недоброчесність	
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	10-24	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:

$$\text{Оцінка} = (П1+П2+П3)/3 ,$$

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

10. Рекомендоване методичне забезпечення

Основна література

1. Вступ до квантової метрології: навчальний посібник Ю.Ф. Павленко і др. Вид-во «Підручник НТУ «ХП» 2013 - 148 с.
2. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення : ДСТУ 3651. 0-97. – [Чинний від 1997-10-09]. – Офіц. вид. – Київ : Держстандарт України, 1998. – 14 с.
3. Ефект Джоузефсона в метрології: сучасний стан / Ю.Ф. Павленко, П.І. Неєжмаков, Н.М. Маслова, В.В. Анікін // Український метрологічний журнал – 2015. – Вип.3. – с. 3–15.
4. Назаренко Л. А. Квантова радіометрія та фотометрія / Л. А. Назаренко, П. І. Неєжмаков,

Є. П. Тимофеев // Український метрологічний журнал. – 2012. – № 1. – с. 30–35.

Допоміжна література

5. XXIV CGPM, Paris, 2011. 24 CGPM Resolution 1. Резолюція 1 24-ї Генеральної конференції з мір та ваг. – Париж, 2011.
6. Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology / H. Katori // Nature Photon. – 2011. – № 5. – P. 203-210.
7. Uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram / R. L. Steiner, E. R. Williams, D. V. Newel e. a. // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2007. – V. 56, № 2. – P. 592–596.
8. Цюцюра В.Д. Метрологія та основи вимірювань : навч. посіб. / В.Д. Цюцюра, С.В. Цюцюра. – К.: Знання-Прес, 2003. – 80 с.

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

1. Національний науковий цент «Інститут метрології»:
<http://www.metrology.kharkov.ua/>
2. Державні еталони України:
<http://metrology.kiev.ua/etalonna-baza/derzhavni-etaloni-ukrajini>
3. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»:
<http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>
4. Сайт для початківців і практикуючих метрологів:
<http://metrology.com.ua/>