

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 4 от 26.04.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Квантовые сенсоры и метрология

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника

Направленность образовательной программы
Квантовые и нейроморфные технологии

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.07 Квантовые сенсоры и метрология относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-2: Способен разрабатывать методики проведения исследований и измерений параметров и характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и наноэлектроники, анализировать их результаты	<p>ПК-2.1: Имеет представление о существующих методиках проведения исследований и измерений параметров и характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и наноэлектроники, а также знаком с методами анализа результатов исследований и измерений</p> <p>ПК-2.2: Проводит исследования и измерения параметров и характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и наноэлектроники, а также анализирует результаты исследований и измерений</p> <p>ПК-2.3: Разрабатывает методики проведения исследований и измерений характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и наноэлектроники</p>	<p>ПК-2.1:</p> <p>Знать отличия классических и квантовых измерений.</p> <p>Уметь разрабатывать методики проведения измерений физических характеристик с использованием квантовых стандартов частоты и времени.</p> <p>Владеть навыками проведения измерений физических параметров и характеристик с использованием квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров.</p> <p>ПК-2.2:</p> <p>Знать методы физических исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров.</p> <p>Уметь разрабатывать методики проведения исследований физических характеристик с использованием квантовых стандартов частоты и времени.</p> <p>Владеть навыками проведения исследований физических</p>	Тест	Зачёт: Контрольные вопросы

		<p>параметров и характеристик с использованием квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров.</p> <p>ПК-2.3: Знать принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров.</p> <p>Уметь анализировать физические характеристики различных объектов с использованием квантовых стандартов частоты и времени.</p> <p>Владеть навыками анализа физических характеристик различных объектов с использованием квантовых стандартов частоты и времени.</p>		
--	--	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	1
самостоятельная работа	75
Промежуточная аттестация	0
	Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
1. Основные понятия квантовой сенсорики и метрологии	20	2	2	4	16
2. Шумы и стабилизация частоты	20	2	4	6	14
3. Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе газов атомов	36	8	6	14	22
4. Атомные интерферометры, гравиметры	27	2	2	4	23
5. Методы улучшения чувствительности квантовых измерений	4	2	2	4	
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	16	16	33	75

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Основные понятия квантовой сенсорики и метрологии.

Классические и квантовые измерения. Точность измерений. Классические и квантовые флуктуации. Виды квантовых сенсоров. Физические платформы, на которых создаются квантовые сенсоры.

2. Шумы и стабилизация частоты.

Основные виды шумов. Источники естественных шумов. Флуктуации напряжения, тока. Шумы в радиоэлектронных приборах.

Основы теории стабилизации частоты. Математическое описание колебаний. Фазовая и амплитудная модуляция. Генератор с обратной связью. Петля обратной связи. Сигнал ошибки.

3. Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе газов атомов.

Основные характеристики стандартов времени и частоты. Историческая перспектива развития часов и стандартов частоты и времени. Атомная и молекулярная спектроскопия. Уровни энергии.

Взаимодействие с электромагнитным излучением. Уширение и сдвиг спектральных линий. Методы работы с атомами и молекулами. Ячейки, пучки, ловушки, охлаждение. Цезиевые атомные часы.

Первичные и лабораторные стандарты. Фонтанные часы. Стандарты частоты в сверхвысокочастотном диапазоне. Мазер. Рубидиевые стандарты частоты. Водородные стандарты частоты.

4. Атомные интерферометры, гравиметры.

Принципы работы атомных интерферометров и гравиметров. Используемые в квантовых интерферометрах и гравиметрах атомные ансамбли. Чувствительность к различным внешним полям. Способы измерения внешних полей. Достижимые характеристики интерферометров и гравиметров. Ограничивающие точность измерения факторы.

5. Методы улучшения чувствительности квантовых измерений.

Коррекция ошибок в задачах квантовых измерений. Неразрушающие измерения.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Авторские презентации по материалам лекций.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

Вопрос 1. Атомный гравиметр – это прибор для

Ответ а): точного измерения ускорения свободного падения;

Ответ б): определения гравиметрической плотности пороха;

Ответ в): определения амплитуды гравитационных волн.

Вопрос 2. Измерением называется

Ответ а): выбор технического средства с нормированными метрологическими характеристиками;

Ответ б): операция сравнения неизвестного с известным;

Ответ в): опытное нахождение значения физической величины с помощью технических средств.

Вопрос 3. Что такое осциллятор?

Ответ а): главный элемент осциллографов;

Ответ б): нормализованный индикатор ценовых колебаний;

Ответ в): любой объект, совершающий колебания (периодическое движение).

Вопрос 4. Какой изотоп цезия используется в атомных часах?

Ответ а): цезий-133;

Ответ б): цезий-136;

Ответ в): цезий-137.

Вопрос 5. Какой квантовый процесс в атомах позволил создать атомные часы?

Ответ а): квантование Бора-Зоммерфельда;

Ответ б): электронные переходы между энергетическими уровнями;

Ответ в): квантовая запутанность.

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Не менее 60% правильных ответов на вопросы из теста
не зачтено	Менее 60% правильных ответов на вопросы из теста

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

	ответа		и недочетами	недочетами		недочетов	
--	--------	--	-----------------	------------	--	-----------	--

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Классические и квантовые измерения. Точность измерений.
2. Классические и квантовые флуктуации.
3. Виды квантовых сенсоров. Физические платформы, на которых создаются квантовые сенсоры.
4. Основные виды шумов в электрических приборах. Источники естественных шумов.
5. Стабилизация частоты. Математическое описание колебаний. Фазовая и амплитудная модуляция.
6. Генератор с обратной связью. Петля обратной связи. Сигнал ошибки.
7. Основные характеристики стандартов времени и частоты.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся отвечает на контрольные вопросы, показывая удовлетворительное знание

Оценка	Критерии оценивания
	основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
не зачтено	Обучающийся показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Риле Ф. - Москва : Физматлит, 2009., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=647106&idb=0>.
2. Ключев А. В. Шумы в радиоэлектронных приборах : учебное пособие / Ключев А. В., Якимов А. В. - Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2023. - 65 с. - Рекомендовано Учёным советом радиофизического факультета для студентов ННГУ, специализирующихся в лаборатории “Лаборатория перспективных квантовых стандартов частоты и систем точного времени” в рамках Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030”. - Книга из коллекции ННГУ им. Н. И. Лобачевского - Инженерно-технические науки., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=867967&idb=0>.
3. Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах / Жигальский Г.П. - Москва : Физматлит, 2012., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=646945&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Высокопроизводительные вычислительные системы и квантовая обработка информации : учебное пособие / Гузик В.Ф.; Гушанский С.М.; Ляпунцова Е.В.; Потапов В.С. - Москва : ЮФУ, 2021. - 202 с. - ISBN 978-5-9275-3787-7., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=808075&idb=0>.
2. Введение в квантовые стандарты частоты : учебное пособие / А. В. Ключев, К. Г. Мишагин, В. А. Поляков [и др.] ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2023. - 43 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=877770&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

- 1) ОС Windows и пакет Office;
- 2) Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом www.eqworld.ipmnet.ru;
- 3) интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ <http://www.lib.unn.ru/>.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, специализированным оборудованием: лабораторным оборудованием

ННГУ.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника.

Автор(ы): Конаков Антон Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

Рецензент(ы): Бастракова Марина Валерьевна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Конаков Антон Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 15.04.2024, протокол № б/н.