

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра квантовой электроники**

академик РАН



УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ

А. Е. Бондарь

2020 г.

**Рабочая программа дисциплины  
СОВРЕМЕННАЯ КВАНТОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ**

Направление подготовки **03.04.02 Физика Курс 1, семестр 2**  
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)			
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часа - в интерактивных формах 16 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

Разработчик:  
д.ф.-м.н., профессор каф. КвЭл ФФ НГУ

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ  
академик РАН

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

В.И. Юдин

С.Н. Багаев

И.Б. Логашенко

Новосибирск 2020

## Содержание

Аннотация .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	5
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	6
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем ..	6
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	7
5. Перечень учебной литературы. ....	10
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	10
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	10
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	11
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	11
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	12

## Аннотация

к рабочей программе дисциплины «Современная квантовая лазерная метрология»

Направление: 03.04.02 Физика

Направленность (профиль): Общая и фундаментальная физика

Программа дисциплины «Современная квантовая лазерная метрология» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню магистратуры по направлению подготовки 03.04.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика», а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ) кафедрой квантовой электроники в качестве дисциплины по выбору. Дисциплина изучается студентами первого курса физического факультета в весеннем семестре.

Цель курса – овладение физическими принципами работы современных стандартов частоты и времени, спектроскопическими методами измерения частоты; ознакомление с новыми тенденциями развития в современной лазерной метрологии

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника профессиональных компетенций:

**ПК-1 – способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.**

**ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области современной квантовой лазерной метрологии; принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области современной квантовой лазерной метрологии; возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области, области применений атомных стандартов частоты, основные физические принципы работы современных атомных часов, как в оптическом, так и СВЧ диапазонах, знать основные систематические сдвиги и методы для их подавления, знать основные спектроскопические методы, используемые в ультра-прецизионной лазерной спектроскопии атомов и ионов, включая спектроскопию Раби, Рэмси спектроскопия, основы теории резонансов когерентного пленения населенностей;
- **Уметь:** самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области современной квантовой лазерной метрологии с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области современной квантовой лазерной метрологии;
- **Владеть:** навыками постановки и решения задач научных исследований в области современной квантовой лазерной метрологии с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, методами расчета спектроскопического сигнала как в случае одного пробного импульса (спектроскопия Раби), так и в случае двух импульсов, разделенных интервалом свободной эволюции (спектроскопия Рамси),

динамического штарковского сдвига атомных уровней, линейного и квадратичного зеемановского сдвига, теплового сдвига.

Курс рассчитан на один семестр (2-й). Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: контроль посещения, опрос по пройденному материалу, реферат.

Промежуточная аттестация: – экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **72** академических часа / **2** зачетных единицы.

## **1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы.**

В результате освоения дисциплины «Современная квантовая лазерная метрология» студенты-физики должны иметь представление о методах теоретического описания взаимодействия атомных переходов с монохроматическим лазерным или радиочастотным полем; знать основные методы возбуждения атомных резонансов; знать основные физические факторы, влияющие на метрологические характеристики атомных часов (точность и стабильность). В рамках данного курса изучаются методы Раби и Рамсеевской спектроскопии сверхвысокого разрешения, эффект когерентного пленения населенностей в бихроматическом поле, исследуются различные систематические сдвиги частоты часового перехода.

Цель курса – овладение физическими принципами работы современных стандартов частоты и времени; методами расчета спектроскопических сигналов; методами расчета основных систематических погрешностей при измерении частоты; изучение новых спектроскопических методов, применяемых в современных атомных часах; ознакомление с основными методами лазерного охлаждения атомов и ионов; ознакомление с новыми тенденциями развития в современной лазерной метрологии

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника профессиональных компетенций:

**ПК-1 – способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.**

**ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

**знать**

- методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области современной квантовой лазерной метрологии; принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области современной квантовой лазерной метрологии; возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области (ПК-1.1)
- области применений атомных стандартов частоты, основные физические принципы работы современных атомных часов, как в оптическом, так и СВЧ диапазонах, знать основные систематические сдвиги и методы для их подавления, знать основные спектроскопические методы, используемые в ультра-прецизионной лазерной спектроскопии атомов и ионов, включая спектроскопию Раби, Рэмси спектроскопия, основы теории резонансов когерентного пленения населенностей (ПК-2.1)

**уметь**

- самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области современной квантовой лазерной метрологии с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий (ПК-1.2)
- применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области современной квантовой лазерной метрологии (ПК-2.2)

**владеть**

- навыками постановки и решения задач научных исследований в области современной квантовой лазерной метрологии с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований (ПК-1.3)
- владеть методами расчета спектроскопического сигнала как в случае одного пробного импульса (спектроскопия Раби), так и в случае двух импульсов, разделенных интервалом свободной эволюции (спектроскопия Рамси); динамического штарковского сдвига атомных уровней; линейного и квадратичного зеемановского сдвига; теплового сдвига (ПК-2.3)

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Современная квантовая лазерная метрология» реализуется в 1 семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой квантовой электроники. Изложение материала опирается на знание студентами основ электромагнитной теории света и квантовой механики; обеспечивается логическая связь дисциплины с курсами «Основы квантовой оптики», «Атомная и молекулярная спектроскопия», «Лазерная спектроскопия», «Нелинейная спектроскопия», «Механическое действие лазерного излучения на атомы», «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на базе ультрахолодных атомов». Курс предшествует выполнению квалификационной работы студента по данной специализации, так как дает ему необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения научных исследований в рамках подготовки его квалификационной работы.

## 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов - в интерактивных формах 16 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов и ее контроль преподавателями с помощью заданий, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: контроль посещения, опрос по пройденному материалу, реферат.

Промежуточная аттестация: – экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **72** академических часа / **2** зачетных единицы:

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов.
- промежуточная аттестация (самостоятельная подготовка, консультация, экзамен) – 22 часа;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 36 часов.

Работа с обучающимися в интерактивных формах (практические занятия) составляет 16 часов.

#### 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)					Групповая консультация (часов)	Промежуточная аттестация (экзамен)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Фундаментальный и инновационный аспекты лазерной метрологии.	1	3	1	1	1			
2	Основы теории резонансного взаимодействия атомов и ионов с электромагнитным полем.	2–3	6	2	2	2			
3	Традиционные методы возбуждения радиочастотного резонанса в рубидиевых и цезиевых стандартах	4	3	1	1	1			
4	Основы теории эффекта КПП.	5	3	1	1	1			
5	Поляризационный аспект эффекта КПП.	6	3	1	1	1			
6	Оптические стандарты частоты.	7	3	1	1	1			
7	Методы лазерного охлаждения и захвата	8	3	1	1	1			

	атомов.								
8	Спектроскопические методы, применяемые в оптических стандартах для детектирования реперного резонанса.	9–10	6	2	2	2			
9	Оптические стандарты нового поколения.	11–12	6	2	2	2			
10	Методы возбуждения сильно запрещенных оптических переходов.	13	3	1	1	1			
11	Основные сдвиги частоты, лимитирующие точность и стабильность современных атомных часов	14	3	1	1	1			
12	Перспективы развития оптических стандартов частоты	15–16	8	2	2	4			
13	Групповая консультация		2					2	
14	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзаменам		18				18		
15	Экзамен		2						2
<b>ВСЕГО</b>			<b>72</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>18</b>		<b>2</b>

### Программа и основное содержание лекций (16 часов)

#### 1. Фундаментальный и инновационный аспекты лазерной метрологии. (1 час)

Обзор существующих стандартов частоты в радиочастотном и оптическом диапазонах. Обзор некоторых новых направлений в современной лазерной метрологии: миниатюрные атомные часы и магнитометры на основе эффекта когерентного пленения населенностей (КПН); первичные оптические стандарты, основанные на атомах, захваченных в оптическую решетку.

#### 2. Основы теории резонансного взаимодействия атомов и ионов с электромагнитным полем. (2 часа)

Уравнение Шредингера в резонансном приближении и его решение в случае монохроматического поля. Матрица плотности. Спонтанное излучение. Некоторые основные методы прецизионной лазерной спектроскопии.

#### 3. Традиционные методы возбуждения радиочастотного резонанса в рубидиевых и цезиевых стандартах. (1 час)

Миниатюрные атомные часы и магнитометры на основе КПН. Чисто оптические методы возбуждения узкого радиочастотного резонанса. На чем основана возможность миниатюризации? Научно-технический инновационный потенциал миниатюрных атомных часов и магнитометров. Различные типы двух-фотонных резонансов.

#### 4. Основы теории эффекта КПН. (1 час)

Понятие «темного» состояния при взаимодействии атома с резонансным электромагнитным полем. Простейшая математическая модель при описании эффекта КПН (трехуровневая  $\Lambda$ -модель атомных уровней).

#### 5. Поляризационный аспект эффекта КПН. (1 час)



Учет вырождения энергетических уровней по проекции углового момента. Выбор оптимальных поляризационных схем возбуждения КПН-резонанса.

**6. Оптические стандарты частоты. (1 час)**

Сравнительный анализ характеристик уже существующих оптических стандартов (стандарты на одиночных ионах и на ансамбле свободных атомов). Ион-атомное «соревнование». Фемтосекундный комб-генератор как необходимый элемент оптических стандартов частоты.

**7. Методы лазерного охлаждения и захвата атомов. (1 час)**

Магнито-оптическая ловушка как необходимый инструмент в современных стандартах частоты. Лазерное охлаждение атомов: доплеровский температурный предел; методы суб-доплеровского охлаждения для атомов и ионов.

**8. Спектроскопические методы, применяемые в оптических стандартах для детектирования реперного резонанса. (2 часа)**

Метод одиночного светового импульса (спектроскопия Раби). Метод Рамсея в разнесенных по времени световых импульсах.

**9. Оптические стандарты нового поколения. (2 часа)**

Идея оптической решетки на «магической» длине волны для сильно запрещенных оптических переходов в щелочноземельных атомах (компенсация полевого сдвига частоты перехода). Зачем нужны оптические решетки (подавление эффектов отдачи и доплеровского сдвига частоты).

**10. Методы возбуждения сильно запрещенных оптических переходов. (1 час)**

Возможность однофотонной спектроскопии сильно запрещенного перехода  $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$  для нечетных (с ненулевым спином ядра) изотопов щелочноземельных атомов. Метод магнито-индуцированной спектроскопии для четных (с нулевым спином ядра) изотопов щелочноземельных атомов.

**11. Основные сдвиги частоты, лимитирующие точность и стабильность современных атомных часов. (1 час)**

Тепловой сдвиг, динамический штарковский, зеемановские сдвиги в магнитном поле, квадрупольные сдвиги (для ионов в ловушке). Обзор некоторых методов, минимизирующих эти сдвиги.

**12. Перспективы развития оптических стандартов частоты. (2 часа)**

Потенциально достижимые метрологические характеристики оптических стандартов, основанных на атомах в решетке, и одиночных ионов в ловушке. Разработка принципиально новых вариантов первичных оптических стандартов. Инновационные применения оптических стандартов частоты в науке и технике.

**Программа практических занятий (16 часов)**

1. Первичные оптические стандарты, основанные на атомах, захваченных в оптическую решетку. (1 час)

2. Основные методы прецизионной лазерной спектроскопии (2 часа)

3. Простейшая математическая модель при описании эффекта КПН (трехуровневая  $\square$ -модель атомных уровней) (1 час)

4. Расчет оптимальных поляризационных схем возбуждения КПН-резонанса (2 час)
5. Фемтосекундный комб-генератор как необходимый элемент оптических стандартов частоты, его составляющие (1 час)
6. Лазерное охлаждение атомов: доплеровский температурный предел; методы суб-доплеровского охлаждения для атомов и ионов (1 час)
7. Метод одиночного светового импульса (спектроскопия Раби). Метод Рамсея в разнесенных по времени световых импульсах (2 часа)
8. Необходимость оптических решеток (подавление эффектов отдачи и доплеровского сдвига частоты) (2 часа)
9. Метод магнито-индуцированной спектроскопии для четных (с нулевым спином ядра) изотопов щелочноземельных атомов (1 час)
10. Обзор некоторых методов, минимизирующих эти сдвиги (1 час)
11. Разработка принципиально новых вариантов первичных оптических стандартов (2 час)

### Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение материала лекций	6
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка реферата	6
Подготовка к экзамену	18

#### 5. Перечень учебной литературы.

##### 5.1. Основная литература:

##### 5.2. Дополнительная литература:

1. Ф. Риле, Стандарты частоты: принципы и приложения, Разделы 6.3 «Охлаждение», 6.4 «Атомные ловушки», 10.1 «Принцип действия ионных ловушек», 10.2 «Практическая реализация ионных ловушек», 10.3 «Ионные стандарты частоты микроволнового и оптического диапазонов», 14.2 «Новые принципы», М.: Физматлит, 2009
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.
  2. Derevianko A., Katori H., Physics of optical lattice clocks // Rev. Mod. Phys. V.83, P.331-347 (2011).
  3. Yudin V.I., Taichenachev A.V., et al., Atomic Clocks with Suppressed Blackbody Radiation Shift // Phys. Rev. Lett. V.107, 030801 (2011).
  4. Akatsuka T., Takamoto M., Katori H., Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions // Nature Physics, V.4, P.954-959 (2008).
  5. Vanier J., Mandache C., The passive optically pumped Rb frequency standard: the laser approach // Appl.Phys. B V.87, P.565-593 (2007).
  6. Hinkley N., et al., An Atomic Clock with  $10^{-18}$  Instability // Science V.341, P.1215-1218 (2013).

7. [Chou](#) C.W., [Hume](#) D.B., [Rosenband](#) T., [Wineland](#) D.J., Optical Clocks and Relativity // Science V.329, P.1630-1633 (2010).
8. [Schmidt](#) P.O., et al., Spectroscopy Using Quantum Logic // Science V.309, P.749-752 (2005).
9. Taichenachev A.V., Yudin V.I., et al., Magnetic field-induced spectroscopy of forbidden optical transitions with application to lattice-based optical atomic clocks // Phys. Rev. Lett. V.96, 083001 (2006).
10. Chou C.W., et al., Frequency Comparison of Two High-Accuracy  $Al^+$  Optical Clocks // Phys. Rev. Lett. V.104, 070802 (2010).
11. Yudin V.I., Taichenachev A.V., et al., Hyper-Ramsey Spectroscopy of Optical Clock Transitions // Phys. Rev. A V.82, 011804(R) (2010).
12. Martin M.J., et al., A Quantum Many-Body Spin System in an Optical Lattice Clock // Science V.341, P.632-636 (2013).
13. Yudin V.I., Taichenachev A.V., et al., Vector magnetometry based on electromagnetically induced transparency in linearly polarized light // Phys. Rev. A V.82, 033807 (2010).

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

Интернет ресурсы статей для реферирования:

<https://journals.aps.org/about>, <https://www.springer.com/journal>

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MSOffice.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

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

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем контроля посещения лекционных и практических занятий, опросом в начале каждой лекции и практического занятия по пройденному материалу. Студентам необходимо подготовить (и представить) реферат по материалам научной литературы в области современной квантовой лазерной метрологии.

#### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции ПК-1 и ПК-2 сформированы не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию в устной форме.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### **Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Современная квантовая лазерная метрология».**

Критери и оценива ния результат ов обучени я	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6

Полнота знаний	ПК 1.1 ПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2 ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3 ПК 2.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

### Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Примеры тем рефератов

1. Оптические стандарты частоты на ионах, захваченных в ловушку Пауля.
2. Оптические стандарты частоты на нейтральных атомах, захваченных в оптическую решетку на магической длине волны.
3. Методы подавления полевого сдвига для оптических стандартов частоты.

#### Экзаменационные билеты

##### Билет №1

1. Что такое стандарты частоты и времени? Область их применения.
2. Атомная матрица плотности, учет релаксационных процессов (спонтанное излучение).

Билет №2

1. Основные метрологические характеристики стандартов частоты (точность и стабильность), их определение и смысл.
2. Эффект когерентного пленения населенностей (КПН) в бихроматическом поле для  $\Lambda$ -системы.

Билет №3

1. Первичные и вторичные стандарты, их взаимосвязь.
2. Поляризационный аспект взаимодействия атомов с полем: поляризация электромагнитной волны, магнитные подуровни атомных состояний.

Билет №4

1. Фундаментальный и инновационный аспекты лазерной метрологии.
2. Различные поляризационные схемы возбуждения резонансов КПН.

Билет №5

1. Первичный стандарт частоты, основанный на цезиевом фонтане.
2. Уравнение Шредингера для двухуровневого атома в резонансном приближении и его решение в случае взаимодействия с монохроматическим полем.

Билет №6

1. Принцип работы современных стандартов частоты в СВЧ диапазоне.
2. Выражение для элементов стационарной матрицы плотности с учетом спонтанной релаксации для двухуровневого атома, взаимодействующего с монохроматическим полем.

Билет №7

1. Атомные часы на основе эффекта КПН. Возможность их миниатюризации.
2. Резонансная форма линии после взаимодействия с двумя электромагнитными импульсами, разделенными интервалом свободной эволюции атома (спектроскопия Рамси).

Билет №8

1. Атомный магнитометр на основе резонансов КПН.
2. Доплеровский эффект и его влияние на резонансную форму линии в атомарном газе.

Билет №9

1. Оптические стандарты частоты. В чем их основные преимущества по сравнению со стандартами в СВЧ диапазоне?
2. Резонансная форма линии после взаимодействия с одним электромагнитным импульсом (спектроскопия Раби).

Билет №10

1. Фемтосекундный комб-генератор как необходимый элемент оптических стандартов частоты.
2. Метод магнито-индуцированной спектроскопии для сильно-запрещенных переходов.

Билет №11

1. Стандарты частоты на одиночных ионах, захваченных ловушкой. Преимущества и недостатки.
2. Тепловой сдвиг. Методы минимизации, его влияния на точность и стабильность атомных стандартов частоты.

Билет №12

1. Оптические стандарты на атомах, захваченных в оптическую решетку на «магической» длине волны.
2. Метод модифицированной рамсеевской спектроскопии (гипер-рамсеевская спектроскопия).

Билет №13

1. Оптические стандарты, на свободных атомах.
2. Полевые сдвиги частоты (динамический штарковский сдвиг, зеемановские линейный и квадратичный сдвиги).

Билет №14

1. Новые идеи в лазерной метрологии (оптические часы на ядерных переходах и на переходах в сильно заряженных ионах).
2. Основные методы лазерного охлаждения и захвата атомов, используемые в современных стандартах частоты.

Билет №15

1. Важность создания высокопрецизионных стандартов частоты для навигационных (ГЛОНАСС, GPS и др.) и информационных систем.
2. Чисто оптические методы возбуждения резонансов в радиочастотном диапазоне (двухфотонные резонансы).

**Форма экзаменационного билета представлена на рисунке**

<b>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</b>	
<b>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</b>	
<b>Физический факультет</b>	
<b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</b>	
1. ....	
2. ....	
Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)	
« ____ » _____ 20 ____ г.	

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде



