

**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
**Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе
ультрахолодных атомов**

Направление подготовки **03.04.02 Физика Курс 1, семестр 1**
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	Дифференциальный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	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										

Разработчик:

д.ф.-м.н., ст. преподаватель кафедры КвЭл ФФ НГУ

О.Н. Прудников

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН

С.Н. Багаев

Руководитель программы

д.ф.-м.н.

И.Б. Логашенко

Содержание

Аннотация.....	3
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.	9
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.9	
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	9
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	10
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	10
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	10

Аннотация

к рабочей программе дисциплины «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов»

Направление: 03.04.02 Физика

Направленность (профиль): Общая и фундаментальная физика

Программа курса «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов» 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 осеннем семестре.

Цель курса – овладение базовыми принципами и физическими механизмами контролируемого приготовления и опроса квантовых состояний ультрахолодных атомов, использования их для построения атомно-оптических интерферометров и высокочувствительных квантовых сенсоров на их основе.

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 квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области, области применений квантовых сенсоров на основе атомно-оптических интерферометров, основные принципы атомной интерферометрии, основные принципы построения стандартов частоты и квантовых сенсоров на основе холодных атомов;
- **Уметь:** самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов;
- **Владеть:** навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами приготовления и манипуляции контролируемых состояний атомной системы основами теории лазерного охлаждения нейтральных атомов; математическими подходами для описания кинетики ультрахолодных атомов в атомно-оптических

интерферометрах, проводить оценки физических параметров различных интерферометрических систем.

Курс рассчитан на один семестр (1-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: выборочный опрос по темам предыдущих лекций, проверка домашних заданий;

Промежуточная аттестация: экзамен.

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

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «**Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов**» необходима для овладения основными представлениями о схемах и принципах построения современных сверхчувствительных квантовых сенсоров.

Цель курса – овладение базовыми принципами и физическими механизмами контролируемого приготовления и опроса квантовых состояний ультрахолодных атомов, использования их для построения атомно-оптических интерферометров и высокочувствительных квантовых сенсоров на их основе.

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 квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области (ПК-1.1), области применений квантовых сенсоров на основе атомно-оптических интерферометров, основные принципы атомной интерферометрии, основные принципы построения стандартов частоты и квантовых сенсоров на основе холодных атомов (ПК-2.1);
- **Уметь:** самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий (ПК-2.1), применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов (ПК-2.2);
- **Владеть:** навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований (ПК-1.3), базовыми принципами приготовления и манипуляции контролируемых состояний атомной системы основами теории лазерного охлаждения нейтральных атомов; математическими подходами для описания кинетики ультрахолодных атомов в атомно-оптических интерферометрах, проводить оценки физических параметров различных интерферометрических систем (ПК-2.3).

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов» 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. Она необходима для овладения основными представлениями схем построения современных сверхчувствительных квантовых сенсоров.

Для успешного освоения курса необходимо знание линейной алгебры и математического анализа и умение применять эти знания при решении задач, так как они составляют основу математического аппарата квантовой физики, знание основ электромагнитной теории света и квантовой механики, так как исследуемые вопросы опираются на квантовые свойства физических систем, т.е. волновые свойства материи, а контроль и манипуляция атомными системами производится резонансным электромагнитным полем. Дисциплина 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. Трудоемкость 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
1	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 34 часа - 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, экзаменов.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: выборочный опрос по темам предыдущих лекций, проверка домашних заданий.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы:

- занятия лекционного типа – 16 часа;
- практические занятия – 16 часов;

- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации, консультации- 20 часов;
- промежуточная аттестация (дифференцированный зачет) – 2 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 (дифференцированный зачет)
			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	Введение	1	4	1	1	2			
2	Математические подходы описания открытых квантовых систем.	2-3	8	2	2	2	2		
3	Механическое действие света на атомы	4-5	8	2	2	2	2		
4	Основы лазерного охлаждения	6-9	16	4	4	4	4		
5	Ловушки для нейтральных атомов и ионов	10-12	12	3	3	3	3		
6	Физическая реализация контролируемой манипуляции квантовыми состояниями атомной системы	13	8	1	1	3	3		
7	Физические принципы и схемы реализаций атомных интерферометров	14-16	14	3	3	2	4	2	
8	Экзамен		2						2
ВСЕГО			72	16	16	18	18	2	2

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. Введение. (1 час)

- 1.1. История развития работ в области ультрахолодных атомов.
- 1.2. Основные достижения и физико-технические приложения лазерно охлажденных атомов.
- 1.3. Области применений квантовых сенсоров на основе атомно-оптических интерферометров

2. Математические подходы описания открытых квантовых систем. (2 часа)

- 2.1. Два подхода для описания эволюции квантовых систем.
- 2.2. Формализм матрицы плотности.
- 2.3. Эквивалентность двух подходов.
- 2.4. Оператор спонтанной релаксации для атомной матрицы плотности.

3. Механическое действие света на атомы (2 часа)

- 3.1. Электродипольное приближение для описания взаимодействия света с атомами в резонансном приближении
- 3.2. Эффект отдачи при взаимодействии света с атомами
- 3.3. Сила спонтанного и вынужденного светового давления

4. Основы лазерного охлаждения (4 часа)

- 4.1. Вигнеровское представление для атомной матрицы плотности
- 4.2. Математический аппарат редукции квантово-кинетического уравнения к уравнению Фоккера-Планка для квазиклассического описания кинетики атомной системы
- 4.3. Механизмы доплеровского лазерного охлаждения.
- 4.4. Пределы лазерного охлаждения
- 4.5. Лазерное охлаждение в полях с неоднородной пространственной поляризацией

5. Ловушки для нейтральных атомов и ионов (3 часа)

- 5.1. Магнитооптическая ловушка
- 5.2. Ловушка Паули для ионов.
- 5.3. Уравнения Матъё.
- 5.4. Секулярное и микродвижение ионов в радиочастотной ловушке.
- 5.5. Зоны устойчивости.
- 5.6. Эффективный потенциал. Глубина радиочастотной ловушки.
- 5.7. Лазерное охлаждение ионов.

6. Физическая реализация контролируемой манипуляции квантовыми состояниями атомной системы (1 час)

- 6.1. Решение динамической задачи эволюции квантовых состояний атома в электромагнитном поле, осцилляции Раби.
- 6.2. Манипуляция квантовыми состояниями атомной системы с помощью резонансного электромагнитного поля.

7. Физические принципы и схемы реализаций атомных интерферометров (3 часа)

- 7.1. Основные принципы атомной интерферометрии
- 7.2. Спектроскопия Раби.
- 7.3. Рэмси спектроскопия.
- 7.4. Интерферометр Рамси – Борде.
- 7.5. Оптические стандарты частоты. Девиация Алана.
- 7.6. Рамановские переходы в трехуровневой схеме, эффективная частота Раби.
- 7.7. Атомный интерферометр трехимпульсная схема.
- 7.8. Эволюция квантовых состояний во внешнем поле сил.
- 7.9. Гравиметр на основе атомного интерферометра.
- 7.10. Лагранжиан частицы во вращающейся системе. Классическое действие во вращающейся системе. Гироскоп на основе атомного интерферометра

Программа практических занятий – решение задач (16 часов)

1. Решение задач по теме «Математические подходы описания открытых квантовых систем» (4 часа).
2. Решение задач по теме «Механическое действие света на атомы. Основы лазерного охлаждения» (4 час).
3. Решение задач по теме «Ловушки для нейтральных атомов и ионов» (2 часа)
4. Решение задач по теме «Физическая реализация контролируемой манипуляции квантовыми состояниями атомной системы» (2 часа)
5. Решение задач по теме «Физические принципы и схемы реализаций атомных интерферометров» (4 часа).

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение материала лекций	16
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Решение домашних заданий	14

5. Перечень учебной литературы.

5.1. Основная литература:

1. Ф. Риле, Стандарты частоты: принципы и приложения, М.: Физматлит, 2009 (электронные ресурсы, издательство "Лань").

5.2. Дополнительная литература:

2. В.Г. Миногин, В.С. Летохов, Давление лазерного излучения на атомы, М: Наука, 1986.
3. А.П. Казанцев, Г.И. Сурдутович, В.П. Яковлев, Механическое действие света на атомы, М: Наука, 1991.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

4. H.J. Metcalf, P. van der Straten, Laser cooling and trapping, 2-d edition, Springer, New York, Berlin, Heidelberg, 2002.
5. Pippa Storey and Claude Cohen-Tannoudji, The Feynman path integral approach to atomic interferometry. A tutorial, J. Phys. II France 4, 1999-2027 (1994)
6. Ch. J. Bordé, Atomic Interferometry and Laser Spectroscopy, in Laser Spectroscopy X, World Scientific (1991)
7. Paul R. Berman, Vladimir S. Malinovsky, Principles of laser Spectroscopy and Quantum Optics, Princeton University Press . Princeton And Oxford (2011)

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

Не используются

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 выборочного опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, проверки выполнения домашних заданий и оценка активности студентов на практических занятиях.

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 области статистической оптики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Он проводится в конце семестра 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.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов».

Критери и оценива ния результ атов 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 аргументированн о отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2 ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстр ированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстриров аны все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстриро ваны все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владени е опытом)	ПК 1.3 ПК 2.3	Отсутствие владения материалом по темам/раздела м дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальны й 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. Продемонстриро ваны знания по решению нестандартных задач.

Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Пример задачи для практических занятий

Записать оптические уравнения Блоха для двухуровневого атома с замкнутым оптическим переходом в резонансном световом поле. Найти стационарное решение.

Пример вопроса к экзамену

Доплеровский механизм лазерного охлаждения двухуровневых атомов. Трение и диффузия. Доплеровский предел температуры охлаждения

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.

