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 радиофизики

Рабочая программа дисциплины

КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

Направление подготовки **03.04.02 Физика**
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Направление подготовки **03.04.01 Прикладные математика и физика**
Направленность (профиль): **Космическое и специальное приборостроение**

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	24	8		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетные единицы из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н. И.Б. Логашенко

Новосибирск 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. 3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы....3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу 4
4. Структура и содержание дисциплины....4
5. Перечень учебной литературы. 6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. 6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. 6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. 7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине....7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. 7

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

Дисциплина «Квантовые приборы СВЧ» имеет своей целью: ознакомление с физическими основами работы и принципами устройства различных квантовых приборов СВЧ, в том числе с методами генерации, усиления и умножения частоты электромагнитных колебаний СВЧ и оптического диапазонов, а также изучение основных характеристик, параметров и важнейших свойств, определяющих их применение для тех или иных исследований.

В настоящее время к разработке и использованию квантовых приборов во всем мире проявляется повышенный интерес, что объясняется их уникальными свойствами. Атомные и молекулярные квантовые генераторы СВЧ характеризуются чрезвычайно высокой стабильностью частоты излучаемых ими электромагнитных волн. Основным достоинством квантовых парамагнитных усилителей СВЧ является крайне низкий уровень собственных шумов и, как следствие, чрезвычайно высокая чувствительность. Развитие многоканальной связи и непрерывный рост объема передаваемой информации стимулирует освоение диапазонов все более высоких частот.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 (ОПОП 03.04.02 Физика) Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	**ПК 1.1** Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. **ПК 1.2** Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	**Знать** методы алгебры, математического анализа и решения дифференциальных уравнений; физические основы и явления, используемые в тех или иных приборах СВЧ, особенности квантовых приборов СВЧ; методы и способы постановки и решения задач генерирования и усиления электромагнитных волн с высокой стабильностью частоты. **Уметь** решать типовые задачи, связанные с применением квантовых приборов СВЧ, в конкретном случае выбрать электронный прибор адекватный решению данной проблемы. **Владеть** навыками выполнения физических исследований при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств; представлением о современном состоянии развития квантовых приборов для научных и практических целей.
ПК-1 (ОПОП 03.04.01 Прикладные математика и физика) Способен осваивать и применять специализированные знания в области физико-математических и (или) естественных наук в своей профессиональной деятельности.	**ПК 1.1** Применяет специализированные знания естественных и (или) физико-математических наук при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности. **ПК 1.2** Применяет классические и новые знания при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности.	

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Квантовые приборы СВЧ» реализуется в весеннем семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02, 03.04.01. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой радиофизики.

Студенты, приступающие к изучению этой дисциплины, должны иметь общую базовую подготовку в рамках программы обучения в бакалавриате по направлению подготовки 03.03.02 Физика, в том числе:

- владеть математическим аппаратом линейной алгебры, математического анализа, теории функций комплексного переменного, дифференциальных уравнений.
- знать основы теории поля, электродинамики, электротехники и радиотехники, схемотехники, физики ускорителей заряженных частиц.
- иметь практический опыт СВЧ измерений.

Результаты освоения курса используются в следующих дисциплинах:

- Прецизионные системы питания ЭФУ;

Освоение дисциплины необходимо при подготовке и выполнении выпускной квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 2 семестр – экзамен.

№	Вид деятельности	Семестр
		2
1	Лекции, ч	24
2	Практические занятия, ч	8
3	Лабораторные занятия, ч	-
4	Занятия в контактной форме, ч из них	36
5	аудиторных занятий, ч	32
6	в электронной форме, ч	-
7	консультаций, час.	2
8	промежуточная аттестация, ч	2
9	Самостоятельная работа, час.	36
10	Всего, ч	72

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента, индивидуальные задания, консультация, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: посещаемость, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателем с помощью проверки индивидуальных заданий**.**

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет __2___ зачетные единицы, __72____ часа.

Данный курс является базовой дисциплиной для студентов, интересующихся радиотехнической специализацией. Основное внимание при изложении материала обращено на принципы действия наиболее распространенных приборов, их основные характеристики и параметры. Рассмотрение строится так, чтобы эти вопросы можно было легко понять без сложного теоретического анализа, требующего увеличения объема курса. Устройства и конструкции приборов рассмотрены в объеме, достаточном для объяснения принципа действия, понимания особенностей применения и эксплуатации этих приборов. Изложение дисциплины строится по типам приборов. Однако для близких по принципу действия приборов предварительно рассматриваются общие для них физические основы.

Программа и основное содержание лекций *(24 часа)*

1. Основные физические понятия квантовой электроники (4 часа)

Энергетические уровни квантовых систем. Спонтанное и индуцированное излучения. Коэффициенты Эйнштейна. Отрицательная температура. Условия самовозбуждения квантового генератора. Поперечное сечение индуцированного излучения. Форма и ширина спектральной линии. Когерентность света. Характеристики когерентности электромагнитного излучения. Особенности характеристики квантовых приборов. Добротность активной среды. Коэффициент усиления и полоса пропускания квантового усилителя. Режим стационарной амплитуды квантового генератора. Шумы схем с активным веществом.

2. Электронный парамагнитный резонанс (2 часа)

Метод электронного парамагнитного резонанса. Спин-спиновое и спин-решеточное взаимодействие. Магнитная восприимчивость. Экспериментальное наблюдение электронного парамагнитного резонанса. Влияние внутрикристаллического поля.

3. Квантовые парамагнитные усилители радиодиапазона (6 часа)

Создание инверсной населенности в трехуровневых и четырехуровневых системах. Кристаллы для парамагнитных усилителей. Квантовые парамагнитные усилители резонаторного тип а. Парамагнитные усилители бегущей волны. Конструирование квантовых парамагнитных усилителей. Применение парамагнитных усилителей.

4. Молекулярные генераторы (2 часа)

Пучковые квантовые генераторы радиодиапазона. Устройство молекулярного генератора на пучке молекул аммиака. Квантовый генератор на пучке атомов водорода. Квантовые стандарты частоты.

5. Оптические квантовые генераторы на основе диэлектриков (2 часа)

Активные среды для лазеров на иных кристаллах и стеклах. Источники и системы накачки лазеров на ионных кристаллах и стеклах. Устройство оптического квантового генератора на рубине и его работа в режиме свободной генерации.

6. Полупроводниковые лазеры (4 часа)

Элементарные сведения о полупроводниках. Неравновесные состояния в полупроводнике. Излучательная рекомбинация при межзонных переходах. Инжекция носителей тока через *p*-*n*-переход. Инжекционный лазер на основе арсенида галлия.

7. Газовые оптические квантовые генераторы (4 часа)

Общая характеристика газовых лазеров. Особенности конструкции газовых лазеров. Газовый разряд. Процессы, приводящие к инверсии населенностей в плазме газового разряда. Газовый лазер на смеси He – Ne. Лазеры в системах связи. Методы модуляции лазерного излучения. Прием оптического излучения. Методы демодуляции.

Программа практических занятий (8 часов)

1. Применение квантовых парамагнитных усилителей (2 часа)

2. Особенности применения полупроводниковых лазеров в технике и быту (2 часа)

3. Использование ОКГ для практических целей (2 часа)

4. Применение лазеров в системах связи (2 часа)

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка индивидуальной темы и изучение ее актуальности	6
Изучение литературы по конкретной индивидуальной теме	6
Оформление результата в виде презентации по выбранной индивидуальной теме	6
Подготовка к экзамену	18

Примеры тем индивидуальных заданий для самостоятельной работы:

1. Устройство и принцип работы молекулярного генератора на пучке молекул аммиака.
2. Расчет добротность открытого резонатора. Внутренние типы колебаний открытого резонатора с рабочим веществом.
3. Применение квантовых генераторов в качестве стандартов частоты.

План выполнения самостоятельных индивидуальных заданий:

1. Выбор темы и ее изучение. Точная в смысловом отношении формулировка темы уточняет проблему, очерчивает рамки исследования, конкретизирует основной замысел.
2. Выявление литературы по теме и ее изучение в контексте решаемой проблемы.
3. Составление развернутого плана, который содержит общую характеристику предмета исследования, а также основные задачи, стоящие перед студентом. Он должен отражать очередность и логическую последовательность намеченных работ, а также наиболее существенные моменты каждого этапа исследования.
4. Оформление индивидуального задания в виде презентации.

5. Перечень учебной литературы

1. *Андрушко Л.М.* Электронные и квантовые приборы СВЧ. Москва: Радио и связь, 1981. (5 экз.)
2. *Пихтин, А. Н.* Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники: учеб. пособие для вузов / А.Н. ПихтинМ. : Высш. шк., 1983. 304 с. (10 экз.)
3. *Баклано Е. В.* Теоретические основы квантовой электроники : учебное пособие : [в 2 ч.] / Новосиб. гос. ун-т, , 2006. (5 экз.)
4. *Качмарек Ф.* Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981. (7 экз.)
5. *Дудкин В.И.* Квантовая электроника. Приборы и их применение. М.: Техносфера, 2006. (3 экз.)
6. *Ярив А.* Квантовая электроника / Пер.с англ.под ред. Я.И.Ханина 2-е изд М. : Сов. радио, 1980. 488 с. (3 экз.). (Загл.1-го изд.:Квантовая электроника и нелинейная оптика, 1973. (2 экз.).

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. *Чернов К.Н.* Квантовые приборы СВЧ: Курс лекций. 2012. URL: https://info.nsu.ru/upload/iblock/611/nr0os32h2lo6dt95rpksy4divyzwwvqk/Quantum.pdf
2. *Качмарек Ф.* Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981. (7 экз.)
3. *Дулин* В. Н. Электронные и квантовые приборы СВЧ : [Учеб.для радиотехн.спец.вузов] 2-е изд.,перераб. М. : Энергия, 1972. 224 с. (1 экз.)

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 используется.

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 MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

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

Для реализации дисциплины «Квантовые приборы СВЧ» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, 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.

Реализация дисциплины в части лекционных занятий или промежуточной аттестации может осуществляется с применением электронного обучения (*на платформе ZOOM),* где обучение проводится на виртуальных аналогах, позволяющим достигать запланированных результатов по дисциплине.

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 посещаемости, выборочного опроса и проверки индивидуальных заданий.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области знаний методов и способов постановки и решения задач создания высокочастотных систем ускорительных комплексов, физических, экспериментальных исследований и промышленных установок.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

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.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК-1 (ОПОП 03.04.02 Физика) **ПК 1.1** Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. **ПК 1.2** Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	**Знать** методы алгебры, математического анализа и решения дифференциальных уравнений; физические основы и явления, используемые в тех или иных приборах СВЧ, особенности квантовых приборов СВЧ; методы и способы постановки и решения задач генерирования и усиления электромагнитных волн с высокой стабильностью частоты. **Уметь** решать типовые задачи, связанные с применением квантовых приборов СВЧ, в конкретном случае выбрать электронный прибор адекватный решению данной проблемы. **Владеть** навыками выполнения физических исследований при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств; представлением о современном состоянии развития квантовых приборов для научных и практических целей.	Опрос в начале каждой лекции, проверки индивидуальных заданий, экзамен
ПК-1 (ОПОП 03.04.01 Прикладные математика и физика) **ПК 1.1** Применяет специализированные знания естественных и (или) физико-математических наук при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности. **ПК 1.2** Применяет классические и новые знания при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности..		

10.2. Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовые приборы СВЧ»

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
Посещаемость занятий: не менее 90%. Индивидуальное задание: выполнено, результат оформлен в виде презентации. **Экзамен** – дан развернутый ответ на вопросы билета. – точность и корректность применения терминов и понятий. – продемонстрировано умение делать выводы и обобщения. – даны исчерпывающие ответы на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины (в ответах допускаются непринципиальные неточности)	*Отлично*

Посещаемость занятий: не менее 75% Индивидуальное задание выполнено, но в работе отмечаются недочеты. **Экзамен** – дан в развернутый ответ на вопросы билета, однако в изложении допускаются единичные неточности в формулировках терминов, которые студент исправляет самостоятельно или после наводящего вопроса преподавателя. – умение делать выводы продемонстрировано. – на дополнительные вопросы даны ответы, но с небольшими пробелами или неточностями, однако студент ориентируется в базовом материале дисциплины и не путает фундаментальные понятия.	*Хорошо*
Посещаемость занятий: не менее 60% Индивидуальное задание выполнено, но поверхностно. Презентация содержит серьезные ошибки в оформлении, логике или тексте, однако суть задания раскрыта в минимально достаточном объеме. **Экзамен**: – студент дает правильный ответ только на один вопрос билета либо воспроизводит отдельные фрагменты лекционного материала, путаясь в деталях. – допускаются частые неточности и ошибки в формулировках, студент с трудом оперирует основными понятиями дисциплины. – способность к самостоятельному анализу недостаточна, студент не может аргументировать позицию и лишь повторяет готовые выводы из лекций. – наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	*Удовлетворительно*
Посещаемость занятий:менее 60% без уважительной причины. Индивидуальное задание не выполнено вообще (или выполнено несамостоятельно / или результат не оформлен в виде презентации и не защищен). **Экзамен**: – ответ на вопросы билета отсутствует полностью или содержит грубые ошибки, свидетельствующие о полном непонимании предмета. – студент не знает базовых терминов и понятий дисциплины, не отвечает на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	*Неудовлетворительно*

10.3. Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Перечень вопросов к экзамену по дисциплине «Квантовые приборы СВЧ»:

Основные физические понятия квантовой электроники

1. Энергетические уровни атомов и молекул.
2. Населенности энергетических уровней при термодинамическом равновесии.
3. Переходы микрочастиц между энергетическими уровнями (спонтанные, вынужденные, релаксационные).
4. Получение состояния с инверсной населенностью уровней. Ширина и контур спектральной линии.

Характеристики квантовых приборов

1. Добротность активной среды.
2. Коэффициент усиления и полоса пропускания квантового усилителя.
3. Режимы стационарной амплитуды квантового генератора.
4. Шумы схем с активным веществом.

Квантовые приборы СВЧ диапазона

1. Электронный парамагнитный резонанс. Кристаллы для парамагнитных усилителей.
2. Создание инверсной населенности в трехуровневых и четырехуровневых системах.

3. Однорезонаторные квантовые парамагнитные усилители (отражательный, проходной резонаторы).
4. Типы резонаторов для парамагнитных усилителей.
5. Парамагнитные усилители бегущей волны.
6. Многорезонаторные парамагнитные усилители. Применение парамагнитных усилителей.

Квантовые стандарты частоты

1. Устройство и принцип действия молекулярного и атомного генераторов. Рабочее вещество.
2. Генератор на пучке атомов водорода.
3. Пассивные стандарты частоты (частотный дискриминатор на газовой ячейке, атомно-лучевой стандарт с цезиевым репером частоты).

Квантовые приборы оптического диапазона

1. Монохроматичность и когерентность излучения (временная, пространственная когерентности и т.д.).
2. Открытые резонаторы для приборов оптического диапазона.
3. Добротность открытого резонатора. Внутренние типы колебаний открытого резонатора с рабочим веществом.
4. Селекция типов колебаний в открытых резонаторах. Спектр излучения лазера.
5. Мощность излучения оптического квантового генератора.
6. Газовый лазер. Газоразрядные лазеры (общие замечания). Особенности конструкции газовых лазеров.
7. Гелий-неоновый лазер.
8. Ионные лазеры.
9. Лазер на углекислом газе (молекулярный лазер). Химические лазеры. Газовые лазеры с оптической накачкой.
10. Твердотельные лазеры (рубиновый лазер).
11. Режимы работы рубинового лазера (пичковый режим). Быстрое включение и выключение обратной связи в лазерах.

Полупроводниковые лазеры

1. Выбор материала для полупроводникового лазера. Уровни и квазиуровни Ферми. Инверсная населенность (отрицательная температура).
2. Инжекция носителей тока через p-n-переход. Инжекционный лазер на основе арсенида галия.
3. Полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением. Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой.

Пример экзаменационного билета:

БИЛЕТ № 1

1. Получение состояния с инверсной населенностью уровней. Ширина и контур спектральной линии.
2. Газовый лазер. Газоразрядные лазеры (общие замечания). Особенности конструкции газовых лазеров.