

**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**



**Рабочая программа дисциплины
Квантовая электродинамика сверхпроводниковых
джозефсоновских кубитов**

Направление подготовки **03.04.02 Физика**

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 ра- бота, не включая пе- риод сессии	Самостоятельная подготовка к проме- жуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные за- нятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные 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:	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
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 «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов» является базовой в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть четырехсеместрового цикла и необходим для овладения методами создания интегрированных оптических систем.

Целью курса является овладение базовыми понятиями и основными теоретическими и экспериментальными методами квантовой информатики на основе сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-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 и способы постановки и решения задач физических исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области физики сверхпроводников, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в области физики сверхпроводников, основы физики сверхпроводников, включая переходы Джозефсона, особенности различных схем реализации кубитов на сверхпроводниках, основные применения сверхпроводящих кубитов для создания квантовых процессоров. Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами приготовления и управления квантовыми состояниями

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		сверхпроводящих квантовых систем, основными физическими моделями сверхпроводящих переходов Джозефсона, основными принципами резонаторной квантовой электродинамики, описаниями динамики сверхпроводящих кубитов.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы:

Дисциплина «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов» реализуется в 3 семестре 2-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой квантовой электроники.

В результате прохождения курса у студентов физического факультета должно сформироваться представление о фундаментальных физических принципах реализации кубитов на основе переходов Джозефсона в сверхпроводниках. Изложение материала опирается на предварительную подготовку студентов в области линейной алгебры, математического анализа, функционального анализа, а также физики твердого тела и квантовой механики.

Данный курс является специальным, предназначенным для освоения представлений о квантовой электродинамике джозефсоновских кубитов. 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

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 3 семестр – экзамен.

№	Вид деятельности	Семестр
		3
1	Лекции, ч	16
2	Практические занятия, ч	16
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

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

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. **Введение. Эффект Джозефсона и макроскопические квантовые явления. (2 часа)**
 - 1.1 Типы сверхпроводниковых кубитов и их сравнительные характеристики.
 - 1.2 Существующие квантовые процессоры на основе сверхпроводниковых кубитов
 - 1.3 Дальнейшие перспективы развития применения сверхпроводниковых кубитов в квантовых технологиях
 - 1.4 Джозефсоновские соотношения между током и фазой.
 - 1.5 Стационарный эффект Джозефсона
 - 1.6 Нестационарный эффект Джозефсона
2. **Сверхпроводниковые устройства с Джозефсоновскими контактами (2 часа)**
 - 2.1 Сверхпроводящее кольцо с одним Джозефсоновским контактом
 - 2.2 Сверхпроводящее кольцо с двумя Джозефсоновскими контактами
 - 2.3 Сверхпроводящее кольцо с тремя Джозефсоновскими контактами. Поточковый кубит.
 - 2.4 Фазовый кубит
 - 2.5 Трансмон
3. **Макроскопические квантовые эффекты в Джозефсоновских переходах ультрамалых размеров. (3 часа)**
 - 3.1 Заряд и фаза как квантовые переменные
 - 3.2 Кулоновская блокада
 - 3.3 Зарядовый кубит и его свойства.
4. **Квантовая электродинамика сверхпроводниковых волноводных структур в микроволновом диапазоне частот. (4 часа)**
 - 4.1 Взаимодействие микроволновых фотонов с кубитами в одномерных твердотельных структурах
 - 4.2 Гамильтониан взаимодействия. Модель Джейнесса-Камингса.
 - 4.3 Кубит в закрытом резонаторе. Суперпозиционное состояние кубита с фотоном. Вакуумные Раби колебания.
 - 4.4 Кубит в резонаторе с конечной добротностью. Спонтанное излучение кубита.
 - 4.5 Кубит в дисперсионном режиме. Гамильтониан взаимодействия.
5. **Описание процессов релаксации и декогерентности в твердотельных кубитах. (3 часа)**
 - 5.1 Выражение однокубитных состояний в терминах матрицы плотности.
 - 5.2 Кинетическое уравнение для матрицы плотности. Оператор Линдблада.
 - 5.3 Коэффициент прохождения микроволнового сигнала через однокубитную структуру в однофотонном приближении. Уравнение Омелянчука.
6. **Экспериментальное определение основных параметров Джозефсоновских кубитов. (2 часа)**
 - 6.1 Спектрокопия энергетических уровней потокового кубита
 - 6.2 Измерение времени релаксации кубита. Затухающие Раби колебания.
 - 6.3 Измерение времени декогеренции кубита. Интерференция Рамсея.

Программа практических занятий (16 часов)

1. **Сверхпроводниковые устройства с Джозефсоновскими контактами (2 часа)**
 - 1.1 Стационарный эффект и нестационарный эффект Джозефсона
 - 1.2 Характеристики Джозефсоновского контакта
 - 1.3 Джозефсоновская генерация.
 - 1.4 Резистивная модель Джозефсоновского контакта

2. **Макроскопические квантовые эффекты в Джозефсоновских переходах ультрамалых размеров. (3 часа)**
 - 2.1 Анализ основных характеристик сверхпроводящих колец с одним, двумя и тремя Джозефсоновскими контактами
 - 2.2 Сравнительный анализ различных видов сверхпроводящих кубитов - потоковый кубит, фазовый кубит и трансмон
 - 2.3 Рассмотрение заряда и фазы как квантовых переменных
3. **Квантовая электродинамика сверхпроводниковых волноводных структур в микроволновом диапазоне частот. (4 часа)**
 - 3.1 Решение задач по описанию взаимодействия микроволновых фотонов с кубитами в различных режимах.
 - 3.2 Анализ взаимодействия кубитов с микроволновым полем в резонаторах.
4. **Описание процессов релаксации и декогерентности в твердотельных кубитах. (3 часа)**
 - 4.1 Решение уравнений для матрицы плотности состояния кубита с учетом релаксации.
 - 4.2 Расчет коэффициента прохождения микроволнового сигнала через однокубитную структуру в однофотонном приближении.
5. **Экспериментальное определение основных параметров Джозефсоновских кубитов. (2 часа)**
 - 5.1 Оценки параметров Джозефсоновских кубитов по спектроскопическим измерениям.
 - 5.2 Оценки времен релаксации кубитов по наблюдению затухающих колебаний Раби и интерференции Рамсея.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	2
Подготовка к практическим занятиям	16
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. **Е. В. Ильичев, Я. С. Гринберг** Квантовая информатика и квантовые биты на основе сверхпроводниковых Джозефсоновских структур, Новосибирск, Изд-во НГТУ. 2013.-172 стр. (Серия «Учебники НГТУ»)
2. **А. Н. Омелянчук, У. В. Ильичев, С. Н. Шевченко** Квантовые когерентные явления в Джозефсоновских кубитах.-Киев.-Наукова Думка. 2013.-168 стр.

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

Дополнительные учебно-методические материалы не требуются.

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.

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

Для реализации дисциплины «**Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов**» 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. Проверкой самостоятельного решения задач.

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 фор-

мированию способности использовать специализированные знания в области Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен 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.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
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.	Знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области физики сверхпроводников, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в области физики сверхпроводников, основы физики сверхпроводников, включая переходы Джозефсона, особенности различных схем реализации кубитов на сверхпроводниках, основные применения сверхпроводящих кубитов для создания квантовых процессоров.	Посещение лекций, экзамен.
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.	Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами приготовления и управления квантовыми состояниями сверхпроводящих квантовых систем, основными физическими моделями сверхпроводящих переходов Джозефсона, основными принципами резонаторной квантовой	Посещение лекций, экзамен.

	электродинамики, описаниями динамики сверхпроводящих кубитов.	
--	---	--

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 90% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан развернутый ответ на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена (или средняя оценка за две потоковые контрольные работы) не ниже «хорошо», – точность и корректность применения терминов и понятий; - умение делать выводы и обобщения, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. В ответах на вопросы обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.	<i>Отлично</i>
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 80% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан правильный ответ на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена (или средняя оценка за две потоковые контрольные работы) не ниже «удовлетворительно», – наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. В ответах на вопросы обучающийся мог допустить незначительные ошибки.	<i>Хорошо</i>
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 70% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан правильный ответ на один вопрос билета и оценка на письменной части экзамена (или хотя бы одна из двух оценок за потоковые контрольные работы) не ниже «удовлетворительно», – наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	<i>Удовлетворительно</i>
<u>Сдача заданий:</u> сдано менее 60% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - не даны правильные ответы на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена «неудовлетворительно», – не отвечает на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	<i>Неудовлетворительно</i>

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

Примеры задач для самостоятельного решения

1. Покажите, что автономный Джозефсоновский контакт обладает нелинейной индуктивностью

$$L_J = \frac{h}{2eI_C} \left(1 - \frac{I^2}{I_C^2} \right)^{-1/2}.$$

2. Сверхпроводящий ток куперовских пар J_S записывается через волновую функцию сверхпроводящего конденсата Ψ в отсутствие магнитного поля следующим образом

$$J_S = -\frac{ie\hbar}{2m} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*). \text{ Как преобразуется это выражение при наличии магнитного поля?}$$

Как из этого преобразованного выражения следует квантование магнитного потока в многосвязном сверхпроводнике?

Пример билета к экзамену

1. Заряд и фаза Джозефсоновского контакта как квантовые переменные. Кулоновская блокада. Зарядовый кубит и его свойства.
2. Коэффициент прохождения микроволнового сигнала через резонатор с кубитом в однофотонном приближении.

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.