

**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 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
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, 2022

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

# 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
<p><b>ПК-1</b> 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.</p>	<p><b>ПК 1.1</b> 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.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Знать</b> 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.</p> <p><b>Уметь</b> 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.</p> <p><b>Владеть</b> 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</p>

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. 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
3	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдель-

ных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов и ее контроль преподавателем, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: контроль посещения лекций и практических занятий, опрос по пройденному материалу, решение задач.

Промежуточная аттестация: – экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные 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, консультация, экзамен) составляет 36 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 трудоемкость (в часах)				Промежуточная Аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Введение. Эффект Джозефсона и макроскопические квантовые явления	1	4	2		2	
2	Сверхпроводниковые устройства с джозефсоновскими контактами	2-3	6	2	2	2	
3	Макроскопические квантовые эффекты в джозефсоновских переходах ультрамалых размеров	4 - 6	8	3	3	2	
4	Квантовая электродинамика сверхпроводниковых волноводных структур в микроволновом диапазоне частот	7 - 10	10	4	4	2	
5	Описание процессов релаксации и декогерентности в твердотельных кубитах	11-13	10	3	3	4	
6	Экспериментальное определение основных параметров джозефсоновских кубитов	14-15	8	2	2	4	
7	Контрольная работа	16	4		2	2	
8	Групповая консультация		2				2
9	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену		18				18
10	Экзамен		2				2
<b>Всего</b>			<b>72</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>24</b>

## 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 формированию 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
<p><b>ПК 1.1</b> 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.</p>	<p><b>Знать</b> 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.</p>	<p>Посещение лекций, экзамен.</p>
<p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Уметь</b> 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.</p> <p><b>Владеть</b> 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 электродинамики, описаниями динамики сверхпроводящих кубитов.</p>	<p>Посещение лекций, экзамен.</p>

## 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	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	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. 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	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 1.2	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.

## 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

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

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

$$J_S = -\frac{ie\hbar}{2m} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*).$$

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.

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

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

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.

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых  
джозефсоновских кубитов»  
по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного