

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Твердотельные квантовые вычисления
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра Российского квантового центра
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.В. Устинов, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры Российского квантового центра 29.01.2025

Аннотация

Этот курс в первую очередь посвящен экспериментальной физике - физическим основам твердотельных квантовых вычислений. Квантовые вычисления - это быстро развивающаяся междисциплинарная область, включающая идеи из квантовой механики, физики конденсированного состояния, квантовой оптики и квантовой обработки информации. За последние несколько лет квантовые компьютеры превратились из мечты в реальность и открыли захватывающие возможности для будущего. В то время как классические компьютеры кодируют информацию в битах, квантовые компьютеры построены с использованием квантовых битов или кубитов. В лекционном курсе будут рассмотрены различные типы кубитов - квантового "железа", которое может быть использовано или уже используется для создания квантовых компьютеров на основе твердотельных технологий.

Мы начнем с краткого введения в концепцию квантовой обработки информации. Затем будут обсуждаться различные экспериментальные реализации кубитов. После краткого обзора микроскопических кубитов (атомов, ионов, фотонов) мы поговорим о существующих твердотельных квантовых платформах, таких как полупроводниковые квантовые точки, вакансии в алмазе, твердотельные примесные спины и другие квантовые двухуровневые системы. Эти подходы в настоящее время позволяют создавать простейшие одно- или двухкубитные схемы. Мы также кратко обсудим интересные теоретические предложения о еще неисследованных типах кубитов, использующие, например, электроны на поверхности сверхтекучего гелия, примесные спины в фуллеренах, и другие.

Основное внимание в курсе будет уделяться сверхпроводникам. После краткого введения в сверхпроводимость мы подробно обсудим сверхпроводящие квантовые схемы. Такие схемы с несколькими кубитами в настоящее время используются в существующих квантовых компьютерах, реализованных Google, IBM, Rigetti и другими IT-компаниями. Мы обсудим функционирование различных типов сверхпроводящих кубитов, поговорим об источниках потерь и причинах дефазировки энергии, различных механизмах декогеренции и стратегиях повышения когерентности сверхпроводящих кубитов. В течение последних нескольких лекций мы сосредоточимся на таких продвинутых темах, как квантовая электродинамика схем, манипулирование и считывание кубитов, а также поговорим о методах коррекции ошибок квантовых вычислений.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Ознакомить студентов с одним из основных направлений развития квантовых технологий – квантовыми вычислениями, в частности с твердотельными квантовыми вычислениями.

Задачи дисциплины

научить студентов ориентироваться в основных физических платформах и алгоритмах для обработки и передачи квантовой информации.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные

	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

основные концепции квантовой обработки информации;
экспериментальные реализации кубитов;
существующие твердотельные квантовые платформы;
теоретические предложения по еще не исследованным типам кубитов, использующим, например, электроны на поверхности сверхтекучего гелия, примесные спины в фуллеренах и другие;
реализации сверхпроводящих квантовых схем.

уметь:

решать широкий спектр задач, связанных с физическими основами твердотельных квантовых вычислений.

владеть:

подходами к созданию простейших одно- или двухкубитных схем, таких как полупроводниковые квантовые точки, алмазные вакансии, твердотельные примесные спины и другие квантовые двухуровневые системы;
основными принципами функционирования различных типов сверхпроводящих кубитов, механизмами декогеренции и стратегиями повышения когерентности сверхпроводящих кубитов.

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

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение: Основы квантовых вычислений	2			2
2	Микроскопические кубиты	2			2
3	Твердотельные кубиты	4			4
4	Сверхпроводимость и джозефсоновские переходы	2			2
5	Фазовый и потоковый кубит	2			2
6	Зарядовый кубит	2			2
7	Считывание состояний кубитов	2			2
8	Трансмон	2			2
9	Флюксониум, сверхиндуктивность, кубит g-потока	2			2
10	Действия с кубитами и гейты	2			2
11	Декогеренция, двухуровневые дефекты	2			2
12	Электроника для измерения и управления кубитами	2			2
13	Квантовые процессоры, симуляторы, коррекция ошибок	4			4
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение: Основы квантовых вычислений

Общее введение в квантовые вычисления. Физические ограничения существующих классических вычислительных платформ.

2. Микроскопические кубиты

Микроскопические кубиты: Атомы, ионы, фотоны.

3. Твердотельные кубиты

Твердотельные кубиты: полупроводниковые квантовые точки, примесные спины, NV-центры, примесные спины в фуллеренах, электроны на поверхности жидкого гелия. Простейшие одно- или двухкубитные схемы.

4. Сверхпроводимость и джозефсоновские переходы

Основное внимание в курсе будет уделяться сверхпроводникам. Поэтому мы посвятим отдельную лекцию основам сверхпроводимости и джозефсоновским переходам.

5. Фазовый и потоковый кубит

С этой лекции мы начнем детально обсуждать сверхпроводящие квантовые схемы. Такие схемы в настоящее время используются в существующих квантовых компьютерах. В этой лекции мы будем обсуждать фазовые и потоковые кубиты.

6. Зарядовый кубит

Первым экспериментально продемонстрированным в 1999 году типом сверхпроводящих кубитов были зарядовые кубиты. Мы обсудим эти пионерские эксперименты и поговорим о проблеме зарядового шума, ограничивающего время когерентности таких кубитов.

7. Считывание состояний кубитов

Квантовая электродинамика схем (circuit QED), модель Джэйнса-Каммингса и считывание кубитов.

8. Трансмон

Трансмоны являются в настоящее время наиболее широко используемыми сверхпроводниковыми кубитами в квантовых процессорах. Мы обсудим преимущества трансмонов, а также их ограничения и недостатки.

9. Флуксониум, сверхиндуктивность, кубит g-потока

Флуксониум является результатом эволюции потокового кубита и открывает новые перспективы для построения квантовых схем. Важнейшим элементом в таких схемах является сверхиндуктивность, свойства которой мы будем обсуждать.

10. Действия с кубитами и гейты

В этой лекции мы будем говорить о манипулировании квантовыми состояниями кубитов, об одно- и двухкубитных вентилях (гейтах), об инструментах управления взаимодействием между кубитами.

11. Декогеренция, двухуровневые дефекты

Мы поговорим об источниках потерь и причинах дефазировки кубитов, различных механизмах декогеренции и стратегиях повышения когерентности сверхпроводящих кубитов.

12. Электроника для измерения и управления кубитами

Управление сверхпроводниковыми кубитами требует генерации коротких микроволновых импульсов с точно заданными амплитудой и фазой. Измерение кубитов включает в себя усиление слабых микроволновых сигналов с использованием параметрических и малошумящих криогенных усилителей. Мы обсудим детали работы практических схем.

13. Квантовые процессоры, симуляторы, коррекция ошибок

Квантовые процессоры делятся на устройства для выполнения универсальных квантовых протоколов и квантовые симуляторы. Мы обсудим преимущества и практические ограничения различных подходов. Вторая часть лекции будет посвящена практическим методам коррекции ошибок квантовых вычислений.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в физику сверхпроводников [Текст] : учеб. пособие для физ. спец. вузов : доп. М-вом высш. и сред. спец. образования СССР / В. В. Шмидт .— М. : Наука, 1982 .— 237 с. - Библиогр.: с. 230-232. - Предм. указ.: с. 233-235. - 10 500 экз.
1. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. —М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 512 с. - ISBN 978-5-9221-1096-9

Дополнительная литература

1. Quantum Computing: An Applied Approach by Jack D. Hidary, Publisher: Springer
2. Principles and Methods of Quantum Information Technologies, Editors: Yamamoto, Yoshihisa, Semba, Kouichi (Eds.)
3. Quantum Semiconductor Devices and Technologies. Editors: Pearsall, Tom (Ed.)

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

arXiv.org

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Проектор, доска, Microsoft PowerPoint, Zoom (если будет удаленное обучение)

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;

– напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

– чтение рекомендованной литературы;

– проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;

– решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;

– подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Общая и прикладная физика
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
кафедра Российского квантового центра
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Разработчик: А.В. Устинов, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту

ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Твердотельные квантовые вычисления» обучающийся должен:

знать:

основные концепции квантовой обработки информации;
экспериментальные реализации кубитов;
существующие твердотельные квантовые платформы;
теоретические предложения по еще не исследованным типам кубитов, использующим, например, электроны на поверхности сверхтекучего гелия, примесные спины в фуллеренах и другие;
реализации сверхпроводящих квантовых схем.

уметь:

решать широкий спектр задач, связанных с физическими основами твердотельных квантовых вычислений.

владеть:

подходами к созданию простейших одно- или двухкубитных схем, таких как полупроводниковые квантовые точки, алмазные вакансии, твердотельные примесные спины и другие квантовые двухуровневые системы;
основными принципами функционирования различных типов сверхпроводящих кубитов, механизмами декогеренции и стратегиями повышения когерентности сверхпроводящих кубитов.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Не предусмотрен.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

1. Физические ограничения существующих классических вычислительных платформ.
2. Микроскопические кубиты: атомы, ионы, фотоны.
3. Твердотельные кубиты: полупроводниковые квантовые точки, примесные спины, NV-центры, примесные спины в фуллеренах, электроны на поверхности жидкого гелия.
4. Простейшие одно- или двухкубитные схемы.
5. Основы сверхпроводимости и джозефсоновские переходы.
6. Фазовый и потоковый кубиты
7. Зарядовый кубит. Проблема зарядового шума.
8. Квантовая электродинамика схем (circuit QED), модель Джэйнса-Каммингса и считывание кубитов.
9. Трансмон. Преимущества, ограничения и недостатки.
10. Флюксониум и сверхиндуктивность
11. Манипулирование квантовыми состояниями кубитов. Одно- и двухкубитные вентили (гейты).
12. Инструменты управления взаимодействием между кубитами.
13. Источники потерь и причины дефазировки кубитов.
14. Механизмы декогеренции и стратегии повышения когерентности сверхпроводящих кубитов.
15. Электроника для измерения и управления кубитами. Детали работы практических схем.

16. Квантовые процессоры и симуляторы. Преимущества и практические ограничения различных подходов.

17. Коррекция ошибок квантовых вычислений.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Изложить принцип Ландаура и сформулировать его в контексте квантовой теории информации. Сформулировать принципиальные отличия обратимых и необратимых вычислений.

2. Виды сверхпроводниковых кубитов.

Билет 2.

1. Опишите основные области применения современных квантовых технологий и объясните их принципы. Квантовый объем как характеристика квантовых компьютеров.

2. Сформулировать критерии ДиВинченцо. Привести универсальный набор квантовых вентилей (гейтов).

Билет 3.

1. Сформулировать принцип Черча-Тьюринга-Дойча. Изложить концепцию квантовых вычислений.

2. Что такое потоковый кубит? Чем он отличается от флаксониума?

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.