

**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:	Проектирование и измерение квантовых схем
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.В. Лебедев, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
10.04.2023

Аннотация

Данный курс описывает принципы проектирования и измерения квантовых схем на сверхпроводниковых кубитах. Описываются базовые однокубитные измерения: Раби, Рамзи, спиновое эхо. Даются теоретические основы, описывающие способы импульсного контроля кубитных схем: X,Y — управляющие импульсы, способы генерации произвольной однокубитной унитарной операции. Описываются способы индуцирования взаимодействия между различными кубитами и создания базовых двухкубитных операций. Рассматриваются методы измерения точности генерируемых унитарных операций.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Дать теоретические знания о методах проектирования и измерения квантовых схем на сверхпроводниковых кубитах.

Задачи дисциплины

Подготовить специалистов для экспериментальных исследований и проектирования квантовых сверхпроводниковых процессоров.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
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:

- типы сверхпроводниковых кубитов, способы их взаимодействия, способы считывания кубитных схем.

уметь:

- проектировать импульсные последовательности для считывания и управления состояниями многокубитных схем.

владеть:

- базовыми навыками проектирования однокубитных схем, способами расчета частот и констант связи различных элементов кубитной схемы.

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	Основные типы измерений кубитов	4			8
2	Типы сверхпроводниковых кубитов	4			8
3	Квантование электрических цепей	4			8
4	Способы считывания состояния кубитов	2			4
5	Способы быстрого считывания	2			4
6	Взаимодействие между кубитами	4			8
7	Перестраиваемые резонаторы	2			4
8	Измерение точности квантовых операций	4			8
9	Оптимизация формы управляющих импульсов	4			8
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Основные типы измерений кубитов

Методы динамического распутывания с низкочастотным шумом, спиновое эхо. Экспериментальные способы генерации управляющих импульсных последовательностей. Квадратурное смешение низкочастотных и высокочастотных сигналов.

2. Типы сверхпроводниковых кубитов

Вывод Гамильтониана и спектра сверхпроводникового трансмона. Устойчивость трансмона к зарядовому шуму. Взаимодействие трансмона с внешним окружением.

3. Квантование электрических цепей

Понятие волнового импеданса и способы его расчета. Общие принципы квантования электрических цепей.

4. Способы считывания состояния кубитов

Вывод Гамильтониана взаимодействия в дисперсионном режиме. Статистическое различение состояний кубита. Влияние резонатора на распад кубита, эффект Парселла. Различение состояний кубита при однократном измерении.

5. Способы быстрого считывания

Модификация схемы считывания при помощи фильтра Парселла, быстрые измерения кубита.
Модификация формы считывающего импульса.

6. Взаимодействие между кубитами

Вывод константы взаимодействия. Теория кросс-резонансного взаимодействия. Способы генерации базовых двух-кубитных вентилей: контрольное НЕТ и контрольная Фаза. Способы генерации двух-кубитных квантовых вентилей для перестраиваемых по частоте кубитов.

7. Перестраиваемые резонаторы

Вывод гамильтониана взаимодействия.

8. Измерение точности квантовых операций

Понятие фиделити квантовых гейтов. Основные причины неидеальности квантовых операций. Измерение точности посредством случайной выбоки из группы Клиффорда. Измерение посредством измерения кросс-энтропийных характеристик.

9. Оптимизация формы управляющих импульсов

Оптимизация формы импульса, минимизирующего выход кубита в состояния невычислительного базиса. Вывод формы управляющего импульса.

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

Учебная аудитория, доска, при необходимости мультимедиапроектор и экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Нильсен, Чанг «Квантовые вычисления и квантовая информация»
2. Steven M. Girvin «Superconducting Qubits and Circuits: Artificial Atoms Coupled to Microwave Photons»
3. Oliver, A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits

Дополнительная литература

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

Не используются

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

Не предусмотрено.

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 текущей и 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 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 фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
курс:	1
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	А.В. Лебедев, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
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 «Проектирование и измерение квантовых схем» обучающийся должен:

знать:

- типы сверхпроводниковых кубитов, способы их взаимодействия, способы считывания кубитных схем.

уметь:

- проектировать импульсные последовательности для считывания и управления состояниями многокубитных схем.

владеть:

- базовыми навыками проектирования однокубитных схем, способами расчета частот и констант связи различных элементов кубитной схемы.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Как измерить время релаксации кубита?
2. Как измерить время когерентности кубита?
3. Что такое динамическое распутывание и спиновое эхо?
4. Что такое эффект Парселла?
5. Основные способы взаимодействия между кубитами?
6. Что такое кубит трансмон?
7. Методы динамического распутывания с низкочастотным шумом, спиновое эхо.

8. Квадратурное смешение низкочастотных и высокочастотных сигналов.
9. Теория кросс-резонансного взаимодействия.
10. Взаимодействие трансмона с внешним окружением.

Примеры контрольных заданий:

1. Вычислить добротность считывающего резонатора кубитной схемы.
2. Вычислить константу связи между кубитами, соединенных полу-волновым резонатором.
3. Вычислить частоту связывающего резонатора при заданных емкостных характеристиках схемы.
4. Вычислить время распада кубита в линию управления.
5. Вычислить время распада за счет эффекта Парселла.
6. Вычислить время распада кубита в линию измерения при наличии фильтра Парселла.
7. Вывод Гамильтониана и спектра сверхпроводникового трансмона.
8. Вывод модификации формы считывающего импульса.
9. Вывод модификации схемы считывания при помощи фильтра Парселла.
10. Вывод гамильтониана взаимодействия.

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

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