

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Проектирование и измерение квантовых схем
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	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 различие 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)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	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.