

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине: Семинар по наноэлектронике и квантовым компьютерам
по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии
Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики
кафедра наноэлектроники и квантовых компьютеров
курс: 1
квалификация: магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет

2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

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

Программа обсуждена на заседании кафедры наноэлектроники и квантовых компьютеров 29.05.2020

Аннотация

Курс "Семинар по нанoeлектронике и квантовым компьютерам" предусматривает ознакомление слушателей с современными (как существующими, так и находящимися в стадии разработки) экспериментальными и теоретическими приложениями квантовой теории информации. Кроме того, большое внимание уделяется ознакомлению с достижениями в смежных областях квантовой физики: полупроводниковой нанoeлектронике, фотонике, квантовой оптике и др., имеющими важное практическое значение и ориентированными на потенциальное применение в сфере квантового компьютеринга. Особенностью курса является непосредственное участие слушателей в работе еженедельных семинаров, проходящих во ФТИРАНе.

Задачи курса:

- введение слушателей в сферу реального проектирования, технологии изготовления и анализа экспериментально созданных компонент квантовых компьютеров;
- знакомство с новыми идеями и концепциями квантовой теории информации;
- обучение основным принципам и культуре научного диспута с применением уже полученных базовых знаний для приобретения дополнительных знаний по квантовой информатике.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Квантовые измерения и томография.
2. Квантовая криптография.
3. Квантовая коммуникация и квантовые сети.
4. Квантовое моделирование.
5. Квантовая память.
6. Топологические квантовые вычисления.
7. «One-way» квантовые вычисления.
8. Архитектура квантовых компьютеров.
9. Новые квантовые алгоритмы.
10. Адиабатические квантовые вычисления.
11. Управление квантовым компьютером.
12. Современные материалы и технология изготовления элементов квантового компьютера.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- ознакомление слушателей с современными (как существующими, так и находящимися в стадии разработки) экспериментальными и теоретическими приложениями квантовой теории информации. Кроме того, большое внимание уделяется ознакомлению с достижениями в смежных областях квантовой физики: полупроводниковой нанoeлектронике, фотонике, квантовой оптике и др., имеющими важное практическое значение и ориентированными на потенциальное применение в сфере квантового компьютеринга. Особенностью курса является непосредственное участие слушателей в работе еженедельных семинаров, проходящих во ФТИРАНе.

Задачи дисциплины

- введение слушателей в сферу реального проектирования, технологии изготовления и анализа экспериментально созданных компонент квантовых компьютеров;
- знакомство с новыми идеями и концепциями квантовой теории информации;
- обучение основным принципам и культуре научного диспута с применением уже полученных базовых знаний для приобретения дополнительных знаний по квантовой информатике.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
--------------------------------	-----------------------------------

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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	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:

1. Современные направления теоретических и экспериментальных исследований в области квантовой информатики.
2. Преимущества и недостатки технологии, математической модели, и экспериментальной реализации того или иного направления, обсуждаемого в рамках семинарских занятий.
3. Основные достижения конкретных научных коллективов (как отечественных, так и зарубежных), работающих в сфере квантовых информационных технологий и смежных областях микро- и нанoeлектроники.

уметь:

1. Объективно анализировать предлагаемую информацию по теме курса.
2. Формулировать вопросы к авторам сообщений и докладов, выступающим на семинаре, и поддерживать научную дискуссию по теме курса.
3. Формировать свою позицию (особенно по спорным и открытым темам, например, связанным с различными интерпретациями некоторых квантовых явлений) и грамотно ее обосновывать.
4. Самостоятельно развивать обсуждаемую тему в рамках знаний, полученных в ходе обучения на базовой кафедре.

владеть:

1. Культурой научного диспута и умением вести продуктивные дискуссии по теме курса.
2. Техникou конспектирования, критического анализа и адаптации предлагаемой информации.

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	Квантовые измерения и томография.		6		3
2	Квантовая криптография.		6		3
3	Квантовая коммуникация и квантовые сети.		6		3
4	Квантовое моделирование.		6		3
5	Квантовая память.		3		2
6	Топологические квантовые вычисления.		3		1
7	«One-way» квантовые вычисления.		6		3
8	Архитектура квантовых компьютеров.		6		3
9	Новые квантовые алгоритмы.		6		3

10	Адиабатические квантовые вычисления.		6		3
11	Управление квантовым компьютером.		3		1
12	Современные материалы и технология изготовления элементов квантового компьютера.		3		2
Итого часов			60		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Квантовые измерения и томография.

Операторы полного набора проективных измерений. Построение экспериментально найденной матрицы плотности квантового состояния в виде гистограммы. Применение общих и специализированных статистических методов для анализа когерентности и запутанности квантового состояния.

2. Квантовая криптография.

Квантовые протоколы секретной связи. Стратегии борьбы с атаками подслушивателей и защита информации, передаваемой по квантовым каналам. Совершенствования способов распределения квантовых ключей. Изучение возможности взлома квантовых сетей. Экспериментальная реализация криптографических протоколов.

3. Квантовая коммуникация и квантовые сети.

Основные элементы квантовых сетей: волноводы, регистры, повторители, конверторы, трансдюсеры и детекторы. Экспериментальное осуществление протокола квантовой телепортации. Гибридные сети микроволнового и оптического диапазонов. Математическое моделирование процесса пересылки фотонов по реальным волноводам и вакууму.

4. Квантовое моделирование.

Использование небольших квантовых компьютеров для решения задач квантовой химии, ориентированных на моделирование химических реакций синтеза новых веществ с заданными свойствами. Разработка новых алгоритмов для практического использования квантовых компьютеров в прикладных целях.

5. Квантовая память.

Использование квантовых ансамблей и одиночных квантовых систем для хранения квантовой информации. Оценка современного состояния той или иной модели квантового регистра с памятью с позиции экспериментального воплощения.

6. Топологические квантовые вычисления.

Понятие о голономных квантовых вычислениях. Использование геометрических фаз Абея, Берри, Пантчаратнама, Ананда и Ааронова – Бома при реализации квантовых вентилей. Кудиты, анионы и фермионы Майорана – альтернативные формы хранения квантовой информации. Преимущества и недостатки топологического квантового компьютеринга.

Семестр: 2 (Весенний)

7. «One-way» квантовые вычисления.

Модель Раушендорфа полномасштабного квантового вычисления, базирующаяся на серии последовательных измерений. Создание и свойства начального кластерного состояния в квантовом регистре и алгоритм измерений, эквивалентный вентиляльному алгоритму. Влияние запутанности высокого уровня для «one-way»-схемы на точность квантовых вычислений.

8. Архитектура квантовых компьютеров.

Одномерные, двумерные и трехмерные квантовые регистры. Понятие о квантовом программировании. Классический компьютер как управляющее устройство для квантового компьютера. Квантовые вычисления с использованием удаленного сервера. Планарные твердотельные ионные ловушки, сверхпроводящие и алмазные фотонные структуры как наиболее перспективные прототипы коммерческих квантовых чипов.

9. Новые квантовые алгоритмы.

Усовершенствованные алгоритмы факторизации и поиска. Использование квантовых случайных блужданий для алгоритма Гровера. Квантовый алгоритм оценки эффективности метода наименьших квадратов решения систем алгебраических уравнений. Теория графов. Ветвящиеся алгоритмы.

10. Адиабатические квантовые вычисления.

Понятие об адиабатических квантовых вычислениях. Энергетическая щель между основным и первым возбужденным состояниями системы, вероятность успеха и время выполнения как основные характеристики адиабатического алгоритма. Эквивалентность обычного и адиабатического подхода к реализации квантовых вычислений.

11. Управление квантовым компьютером.

Высокопроизводительные вычислительные системы и суперкомпьютеры как контролирующие устройства для квантового компьютера. Элементы классического интерфейса квантового регистра: лазеры, ловушки, затворы и др.

12. Современные материалы и технология изготовления элементов квантового компьютера.

Кремний, алмаз и сверхпроводники как основа элементной базы твердотельных квантовых компьютеров. Методы микро- и нанoeлектроники, применяемые для обработки полупроводниковых монокристаллов и гетероструктур с целью формирования кубитов.

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

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. – М: Мир, 2006.
2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность (2-ое изд). Москва – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2004.
3. Michler P. (Ed.) Single Semiconductor Quantum Dots (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009).
4. Skorobogatiy M., Yang J. Fundamentals of Photonic Crystal Guiding (Cambridge University Press 2009).

Дополнительная литература

1. Шляйх В.П. Квантовая оптика в фазовом пространстве. Москва: Физматлит, 2005.
2. Boudriboua A. Photonic waveguides: theory and applications (John Wiley & Sons, Inc. 2009).

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

1. <http://arxiv.org>
2. <http://publish.aps.org>
3. <http://www.nature.com>
4. <http://www.sciencemag.org>
5. <http://gen.lib.rus.ec/>
6. <http://www.ftian.ru>

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

на занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, прослушавший курс семинаров, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех семинаров, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении семинаров;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к докладчику на семинаре.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанoeлектроники и квантовых компьютеров
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: А.В. Цуканов, канд. физ.-мат. наук, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	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 «Семинар по нанoeлектронике и квантовым компьютерам» обучающийся должен:

знать:

1. Современные направления теоретических и экспериментальных исследований в области квантовой информатики.
2. Преимущества и недостатки технологии, математической модели, и экспериментальной реализации того или иного направления, обсуждаемого в рамках семинарских занятий.
3. Основные достижения конкретных научных коллективов (как отечественных, так и зарубежных), работающих в сфере квантовых информационных технологий и смежных областях микро- и нанoeлектроники.

уметь:

1. Объективно анализировать предлагаемую информацию по теме курса.
2. Формулировать вопросы к авторам сообщений и докладов, выступающим на семинаре, и поддерживать научную дискуссию по теме курса.
3. Формировать свою позицию (особенно по спорным и открытым темам, например, связанным с различными интерпретациями некоторых квантовых явлений) и грамотно ее обосновывать.
4. Самостоятельно развивать обсуждаемую тему в рамках знаний, полученных в ходе обучения на базовой кафедре.

владеть:

1. Культурой научного диспута и умением вести продуктивные дискуссии по теме курса.
2. Техникou конспектирования, критического анализа и адаптации предлагаемой информации.

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.

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

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. В чем состоит квантовая томография?
2. Перечислить основные протоколы квантовой криптографии.
3. На каком максимальном расстоянии к настоящему времени удалось реализовать квантовую связь?
4. Привести примеры задач квантового моделирования.

5. Какие физические системы наиболее перспективны для реализации квантовой памяти в квантовом компьютере?
6. Как осуществляется требуемая эволюция вектора состояния кубита путем фазовой инженерии в топологическом квантовом компьютере?
7. Привести выражение для гамильтониана, генерирующего начальное кластерное состояние в схеме Раушендорфа.
8. В особенность использования общей шины в архитектуре квантового компьютера?
9. Перечислить основные результаты теории квантовых алгоритмов, полученные к настоящему времени.
10. Привести условие адиабатичности квантового процесса.
11. Перечислить основные элементы управляющего интерфейса для некоторой схемы (по желанию) квантового компьютера и пояснить принципы их функционирования.
12. Привести постадийную технологическую схему изготовления элементной базы твердотельного квантового регистра на примере NV-центров в алмазе.
13. В чем состоит смысл введения «скрытых параметров» в квантовую теорию?
14. Чем отличаются гомодинная и гетеродинная схемы детектирования одиночных фотонов?
15. Пояснить суть эффектов Аронова – Бомы и Аронова – Кашера.
16. Кратко перечислить основные достижения в сфере проектирования и изготовления твердотельных квантовых чипов.
17. Каково максимальное количество твердотельных кубитов, на которых к настоящему времени продемонстрированы нелокальные квантовые операции?
18. В чем состоит проблема классификации запутанных состояний для гильбертовых пространств с размерностью больше 2?
19. Дать краткий сравнительный анализ существующих систем-прототипов квантового регистра на основе кремниевых, алмазных и сверхпроводниковых структур.
20. Пояснить принципы активной коррекции квантовых шумов.

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;

- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

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

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.