

**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)**

<b>по дисциплине:</b>	Семинар по наноэлектронике и квантовым компьютерам
<b>по направлению:</b>	Электроника и наноэлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и наноэлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра наноэлектроники и квантовых компьютеров
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	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, оценить 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)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанoeлектроники и квантовых компьютеров
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	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, оценить 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.