

**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:	Лабораторный практикум по квантовой фотонике и криптографии
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: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 30 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.В. Макаров, phd (к.ф.-м.н.)

Программа обсуждена на заседании кафедры Российского квантового центра 29.01.2025

Аннотация

Лабораторный практикум дает студенту представление о современных приборах и технологических методах квантовой фотоники и криптографии. В ходе 6 лабораторных работ студент знакомится с однофотонными детекторами и методами их характеристики, волоконно-оптическими интерферометрами, рефлектометрией, учится работать с квантовой системой передачи ключа и физическим генератором случайных чисел. В работах используются современные генераторы сигналов, электронные счетчики, осциллографы и системы регистрации времени, полупроводниковые лазеры, фотодетекторы и модуляторы оптических сигналов, компьютерные системы управления экспериментом.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Дать студенту представление о современных приборах и технологических методах квантовой фотоники и криптографии.

Задачи дисциплины

- Развить у студентов навыки практической работы с приборами и устройствами квантовой обработки информации, основанными на фотонике;
- закрепить теоретические знания, полученные из предшествующих лекционных курсов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов
	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
	УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей 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-2.2 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-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	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-1.2 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:

Практические аспекты работы с источниками и приемниками фотонов, волоконно-оптическими интерферометрами, современным приборно-вычислительным оснащением фотонной лаборатории.

уметь:

Использовать современное приборно-вычислительное оснащение фотонной лаборатории, применять теоретические знания по квантовой обработке информации для решения практических задач.

владеть:

Базовыми навыками работы в фотонной лаборатории.

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	Лабораторная работа 1. Характеризация детектора одиночных фотонов.			5	10

2	Лабораторная работа 2. Настройка волоконно-оптического интерферометра и интерферометрия в однофотонном режиме.			5	10
3	Лабораторная работа 3. Рефлектометрия со счетом фотонов и волоконно-оптический интерферометр с автокомпенсацией дрейфа.			5	10
4	Лабораторная работа 4. Квантовая передача ключа через волоконно-оптический канал связи.			5	10
5	Лабораторная работа 5. Квантовый оптический источник случайных чисел.			5	10
6	Лабораторная работа 6. Тестирование детектора одиночных фотонов на взломоустойчивость.			5	10
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. Лабораторная работа 1. Характеризация детектора одиночных фотонов.

Измерение основных характеристик детектора одиночных фотонов на лавинном фотодиоде: эффективности детектирования, линейности и максимальной скорости счета, мертвого времени, после импульсов, джиттера.

2. Лабораторная работа 2. Настройка волоконно-оптического интерферометра и интерферометрия в однофотонном режиме.

Получение интерференции света в волоконно-оптическом интерферометре. Стабилизация интерферометра. Эксперимент Юнга (интерференционная картина с одиночными фотонами).

3. Лабораторная работа 3. Рефлектометрия со счетом фотонов и волоконно-оптический интерферометр с автокомпенсацией дрейфа.

Промышленный рефлектометр для волоконно-оптических систем связи. Идентификация компонентов и измерение их характеристик по рефлектограмме. Переход в режим счета фотонов для увеличения чувствительности.

4. Лабораторная работа 4. Квантовая передача ключа через волоконно-оптический канал связи.

Настройка и запуск системы квантовой передачи ключа на автокомпенсационной волоконно-оптической схеме. Проверка ее основных характеристик.

5. Лабораторная работа 5. Квантовый оптический источник случайных чисел.

Настройка и запуск физического генератора случайности на фазе спонтанного излучения полупроводникового лазерного диода. Проверка корректности его режима работы, снятие и статистическое тестирование полученной выходной последовательности.

6. Лабораторная работа 6. Тестирование детектора одиночных фотонов на взломоустойчивость.

Демонстрация ослепления детектора одиночных фотонов на основе лавинного фотодиода и демонстрация классического управления им с помощью яркого света. Измерение его характеристик в режиме атаки на систему квантовой передачи ключа. Тестирование возможной контрмеры.

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

Лабораторные установки в лабораториях квантовых коммуникаций и квантового взлома РКЦ, поддерживаемые в рабочем состоянии сотрудниками упомянутых лабораторий и компании КуРейт.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в квантовую теорию информации [Текст] : [лекции для студентов вузов] / А. С. Холево ; Независимый Моск. ун-т ; Высший колледж математ. физики .— М : МЦНМО, 2002 .— 128 с.

Дополнительная литература

1. Оптика и фотоника. Принципы и применения. В 2 т. Т. 2 /Б. Салех, М. Тейх ; пер. с англ. В. Л. Дербова%*d*Fundamentals of Photonics. Долгопрудный, Интеллект, 2012
2. Оптика и фотоника. Принципы и применения. В 2 т. Т. 1 /Б. Салех, М. Тейх ; пер. с англ. В. Л. Дербова%*d*Fundamentals of Photonics. Долгопрудный, Интеллект, 2012

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

1. Guide materials to each lab: <http://www.vad1.com/c/qphcl/>
2. <https://arxiv.org/> - open-access archive for articles in the fields of physics, mathematics, computer science, etc.

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

Лабораторное оборудование подключено к компьютерам, на которых установлено специализированное программное обеспечение для приёма и обработки данных.

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

Для успешного овладения курсом, помимо посещения лабораторных занятий, студенты обязаны заниматься самостоятельно. Самостоятельная работа включает:

- изучение методического описания лабораторных работ перед их выполнением, подготовка ответов на контрольные вопросы преподавателя;
- обработку и критический анализ данных, полученных в результате выполнения лабораторной работы, подготовку письменного отчёта к следующей неделе после её выполнения;
- почтение дополнительной литературы, включая обзоры в журналах, посвящённой изучаемым физическим явлениям и современным экспериментальным методикам их исследования, а также практическому применению.

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: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: В.В. Макаров, phd (к.ф.-м.н.)

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов
	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
	УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
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-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	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-1.2 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 «Лабораторный практикум по квантовой фотонике и криптографии» обучающийся должен:

знать:

Практические аспекты работы с источниками и приемниками фотонов, волоконно-оптическими интерферометрами, современным приборно-вычислительным оснащением фотонной лаборатории.

уметь:

Использовать современное приборно-вычислительное оснащение фотонной лаборатории, применять теоретические знания по квантовой обработке информации для решения практических задач.

владеть:

Базовыми навыками работы в фотонной лаборатории.

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

Студенты выполняют работы парами по 2 человека и пишут один отчет на пару. При нечетности числа студентов в потоке возможно выполнение некоторых работ одним человеком.

Для получения допуска к каждой работе каждый студент в паре должен предварительно самостоятельно изучить методические материалы и устно ответить на контрольные вопросы. Примеры контрольных вопросов:

1. Назвать цели работы и возможные методы их достижения.
2. Нарисовать схему установки.
3. Объяснить принцип работы используемых приборов.

Методические указания по каждой лабораторной работе содержат список вопросов по анализу и объяснению полученных результатов, на которые необходимо ответить в письменном отчете. Студенту нужно будет объяснить, чем определяются наблюдаемые отклики и особенности работы системы, форма полученных кривых и вид снятых осциллограмм, сопоставить измеренные значения параметров с теоретическими принципами работы изучаемых устройств. По каждой работе пара готовит один письменный отчет и сдает его на чтение преподавателю. После прочтения преподаватель либо принимает отчет, либо при наличии у него вопросов и замечаний проводит беседу с парой. Примеры вопросов:

1. Объяснить особенности представленных данных и методов измерений.
2. Объяснить результаты и выводы.
3. Доработать отчет, доснять характеристики.

При наличии более одного непринятого отчета по проделанным работам пара не допускается к последующим работам.

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

1. Основные характеристики детектора одиночных фотонов на лавинном фотодиоде.
2. Получение интерференции света в волоконно-оптическом интерферометре. Стабилизация интерферометра.
3. Эксперимент Юнга (интерференционная картина с одиночными фотонами).
4. Принцип работы промышленного рефлектометра для волоконно-оптических систем связи. Идентификация компонентов и измерение их характеристик по рефлектограмме.
5. Настройка и запуск системы квантовой передачи ключа на автокомпенсационной волоконно-оптической схеме. Проверка ее основных характеристик.
6. Физический генератор случайности на фазе спонтанного излучения полупроводникового лазерного диода. Проверка корректности его режима работы, снятие и статистическое тестирование полученной выходной последовательности.
7. Ослепление детектора одиночных фотонов на основе лавинного фотодиода и классическое управление им с помощью яркого света. Характеристики детектора в режиме атаки на систему квантовой передачи ключа. Возможные контрмеры.

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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

Аттестация по дисциплине «Лабораторный практикум по квантовой фотонике и криптографии» осуществляется в форме:

- дифференцированный зачет по лабораторным работам в 10 семестре.