

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра квантовой электроники**



**Рабочая программа дисциплины
КРЕМНИЕВАЯ ФОТОНИКА**

Направление подготовки **03.04.02 Физика**
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И.Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы:.....	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.....	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.....	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	7
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	7

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Кремниевая фотоника» является базовой в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть четырехсеместрового цикла и необходим для овладения методами создания интегрированных оптических систем.

Целью курса является овладение базовыми понятиями и основными теоретическими и экспериментальными методами современной кремниевой фотоники.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p>ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Знать основные принципы волноводной оптики и свойства оптических мод, особенности распространения оптических волн в высококонтрастных структурах кремний на изоляторе (КНИ), созданных в рамках кремниевой технологии, основы кремниевой нанофотоники, основы современных фотонных технологий, предназначенных для телекоммуникаций, сенсоров, микроволновой (радио) фотоники.</p> <p>Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области кремниевой фотоники с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, моделировать распространение излучения в оптических волноводах, интегрированных в кремниевые наноструктуры.</p> <p>Владеть методами современных фотонных технологий, предназначенных для телекоммуникаций, сенсоров, микроволновой (радио) фотоники, и множества других приложений, методами анализа параметров пассивных и активных оптических элементов.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы:

Дисциплина «Кремниевая фотоника» реализуется в 1 семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Изложение материала опирается на знание студентами математики (математического анализа, функционального анализа,

методов математической физики) и физических дисциплин (знание электродинамики, геометрической, волновой и электромагнитной оптики, квантовой механики, физики конденсированного состояния, а также оптики и физики лазеров). Методы кремниевой фотоники широко используются для создания интегральных оптических систем. Этим определяется глубокая взаимосвязь данного курса с другими курсами, изучаемыми магистрантами кафедры квантовой электроники, в том числе с курсами «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики», «Введение в физическое квантовое программирование» и «Квантовая электродинамика сверхпроводящих Джозефсоновских кубитов». Курс предшествует выполнению квалификационной работы студента по данной специализации, так как дает ему необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения научных исследований в рамках подготовки его квалификационной работы.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов и ее контроль преподавателями с помощью заданий, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: контроль посещения, опрос по пройденному материалу, решение задач.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетных единицы:

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (самостоятельная подготовка, консультация, экзамен) – 22 часа;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультация, экзамен) составляет 36 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Введение в кремниевую фотонику.	1-4	10	4	4	2	
2	Кремниевые оптические устройства	5-7	10	3	3	4	
3	Оптические модуляторы и источники	8-10	10	3	3	4	
4	Интеграция элементов кремниевой фотоники	11-13	10	3	3	4	
5	Современные исследования в кремниевой фотонике	14-16	10	3	3	4	
6	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену		18				18
7	Групповая консультация		2				2
8	Экзамен		2				2
Всего			72	16	16	18	24

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. Введение в кремниевую фотонику. (4 часа)

Кремниевые оптические волноводы. Основные типы оптических волноводов, используемых в кремниевой фотонике. Оптические потери в кремниевых волноводах. Двойное лучепреломление в кремниевых волноводах. Элементы связи оптического волокна с малоразмерными кремниевыми оптическими волноводами.

2. Кремниевые оптические устройства. (3 часа)

Пассивные кремниевые оптические устройства (решетка и адиабатические элементы связи, интерферометры Маха-Цендера и кольцевые резонаторы, оптические модуляторы, фильтры и мультиплексоры). Разделение оптических волноводных пучков. Кремниевые оптические резонаторные структуры. Фотонные кристаллы. Перестройка длины волны оптического фильтра в кремниевой фотонике. Оптические свойства и возможное применение сегментированных периодических решеток в кремниевой фотонике.

3. Оптические модуляторы и источники. (3 часа)

Оптические модуляторы в кремниевых интегрально-оптических структурах. Оптические источники в кремниевых интегрально-оптических структурах. Внешняя эффективность работы лазерного источника оптического излучения. Детектирование оптического излучения в кремниевой фотонике. Интегрально-оптические фотодетекторы.

4. Интеграция элементов кремниевой фотоники. (3 часа)

Интеграция разнородных оптоэлектронных компонентов на единой кремниевой подложке. Оптическое пересечение малоразмерных кремниевых волноводов. Гибридная интеграция элементов III-V на кремнии. Компоновка элементов кремниевой фотоники.

5. Современные исследования в кремниевой фотонике. (3 часа)

Перспективы создания интегральных оптических схем. Проблема скорости передачи данных. Оптическое преобразование сигналов. Применение кремниевой фотоники для телекоммуникаций.

Программа практических занятий (16 часов)

1. Введение в кремниевую фотонику. (4 часа).

Изучение основных интегрально-оптических схем. Расчет основных параметров волноводов. Расчет критических углов. Расчет распределения электромагнитных полей в волноводах.

2. Кремниевые оптические устройства. (3 часа)

Волноводные моды. ТЕ- и ТМ-моды. Расчет параметров пассивных кремниевых оптических устройств (решетка и адиабатические элементы связи, интерферометры Маха-Цендера и кольцевые резонаторы, оптические модуляторы, фильтры и мультиплексоры). Расчет условия для разделения оптических волноводных пучков. Фотонные кристаллы и расчет параметров решеток Брэгга. Перестройка длины волны оптического фильтра в кремниевой фотонике.

3. Оптические модуляторы и источники. (3 часа)

Расчет схем ввода излучения в оптическое волокно. Расчет параметров оптических модуляторов в кремниевых интегрально-оптических структурах. Анализ условий применения различных оптических источников в кремниевых интегрально-оптических структурах. Внешняя эффективность работы лазерного источника оптического излучения. Расчет параметров детекторов оптического излучения в кремниевой фотонике.

4. Интеграция элементов кремниевой фотоники. (3 часа)

Оптические схемные соединения. Расчет параметров связанных оптических волноводов. Анализ различных подходов к компоновке элементов кремниевой фотоники. Невзаимные оптические соединения. Основные конфигурации оптических коммутаторов.

5. Современные исследования в кремниевой фотонике. (3 часа)

Микроэлектромеханические системы. Полупроводниковые фотонные коммутаторы. Коммутация с использованием солитонов.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	2
Решение задач	16
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Салех, Бахаа Е. А. Оптика и фотоника. Принципы и применения: [учебное пособие: в 2 т.] / Б. Салех, М. Тейх; пер. с англ. В.Л. Дербова. Долгопрудный: Интеллект, 2012.; 25 см. Т.1. 2012. 759 с.: ил., [4] л. ил. ISBN 978-5-91559-038-9. (3 экз)
2. Салех, Бахаа Е. А. Оптика и фотоника. Принципы и применения: [учебное пособи: в 2 т.] / Б. Салех, М. Тейх; пер. с англ. В.Л. Дербова. Долгопрудный: Интеллект, 2012.; 25 см. Т.2. 2012. 780 с.: ил., [8] л. ил. ISBN 978-5-91559-135-5. (3 экз)
3. Панов, М. Ф. Физические основы фотоники: учебное пособие / М. Ф. Панов, А. В. Соломонов. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 564 с. — ISBN 978-5-8114-2319-4. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/212564>

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

1. G T Reed & AP Knights, "Кремниевая фотоника: Введение" (Silicon Photonics: An Introduction" (Wiley 2004)

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MSOffice.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем контроля посещения лекционных и практических занятий, опросом в начале каждой лекции и практического занятия по пройденному материалу, проверкой решения задач студентами.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области кремниевой фотоники в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в устной форме.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные принципы волноводной оптики и свойства оптических мод, особенности распространения оптических волн в высококонтрастных структурах кремний на изоляторе (КНИ), созданных в рамках кремниевой технологии, основы кремниевой нанофотоники, основы современных фотонных технологий, предназначенных для телекоммуникаций, сенсоров, микроволновой (радио) фотоники.	Опрос в начале каждой лекции, экзамен.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области кремниевой фотоники с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, моделировать распространение излучения в оптических волноводах, интегрированных в кремниевые наноструктуры. Владеть методами современных фотонных технологий, предназначенных для телекоммуникаций, сенсоров, микроволновой (радио) фотоники, и множества других приложений, методами анализа параметров пассивных и активных оптических элементов.	Опрос в начале каждой лекции, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Кремниевая фотоника».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Задачи для самостоятельного решения

10.2.1.1. Свет, имеющий в свободном пространстве длину волны 870 нм, направляется тонкой плоской пленкой толщины 2 мкм с показателем преломления 1,6, которую окружает среда с показателем преломления 1,4. Определите критический угол, числовую апертуру и минимальный угол прием для света, падающего из воздуха.

10.2.1.2. Прямоугольный диэлектрический волновод имеет квадратное сечение площадью 0.01 кв.мм. и числовую апертуру 0.1. Постройте график числа ТЕ мод как функции частоты излучения.

10.2.1.3. Определите длину волновода, при которой он действует, как 50% делитель.

10.2.1.4. Определите коэффициенты связи между двумя идентичными пластинчатыми волноводами толщиной 0,5 мкм, расстояние между которыми 1 мкм, показатели преломления 1,48, в среде с показателем преломления 1,46 при длине волны 850 нм. Считайте, что оба волновода работают на ТЕ-моды $cm=0$.

10.2.1.5. Какова наибольшая толщина планарного симметричного диэлектрического волновода с показателями преломления 1,5 и 1,46, для которого существует только одна ТЕ-мода на длине волны 1300 нм?

10.2.1.6. В планарном симметричного диэлектрического волновода с показателями преломления 1,5 и 1,46, для которого существует только одна ТЕ-мода на длине волны 1300 нм, толщина слоя при этом максимальна. Какого число мод, если при той же толщине слоя заменить длину волны на 850 нм?

10.2.1.7. Постройте график ТЕ-моды $cm=0$ для пластинчатого волновода со следующими параметрами: показатели преломления 1,48 и 1,46, толщина 0,5 мкм, длина волны 850 нм. Определите фактор ограничения.

10.2.1.8. Электрооптический интерферометр Маха-Цендера используется в качестве перекрестного коммутатора. Приложение полуволнового напряжения приводит к фазовому сдвигу на π . Если коммутатор установлен в параллельное состояние при напряжении, равном нулю, какое напряжение нужно приложить для его переключения в перекрестное состояние?

Примеры билетов к экзамену

Билет 1

1. Главный тип оптических волнопроводов, используемых в кремниевой фотонике? Основные свойства волнопроводов кремниевой фотоники.
2. Физическая природа и особенности оптических потерь в кремниевых волноводах.

Билет 2

1. Причина и особенности двойного лучепреломления в кремниевой фотонике.
2. Эффективное соединение малоразмерного кремниевого волновода с оптическим волокном.

Билет 3

1. Пассивные оптические элементы кремниевой фотоники.
2. Разделение оптических волноводных пучков на два пучка, распространяющихся в двух отдельных волноводах.

Билет 4

1. Главное применение интерферометра Маха-Цендера в кремниевой фотонике.
2. Оптический демультиплексор на основе кремниевой фотоники.

Билет 5

1. Резонаторные структуры в кремниевой фотонике.
2. Свойства фотонных кристаллов, используемых в кремниевой фотонике.

Билет 6

1. Оптические модуляторы в системах кремниевой фотоники.
2. Источники оптического излучения на основе кремниевой фотоники.

Билет 7

1. Основные физические эффекты, от которых зависит внешняя эффективность работы лазерного источника оптического излучения.
2. Регистрация мощности оптического излучения в кремниевом волноводе

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

<p>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</p> <p>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования</p> <p>«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</p> <p>Физический факультет</p>
<p>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</p> <p>1.</p> <p>2.</p> <p>Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 ____ г.</p>

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Кремниевая фотоника»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного