

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Расчет, дизайн и методы изготовления интегрально-оптических компонентов для квантовых вычислительных систем

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

**3. Направление подготовки:** 03.04.02 Физика (магистратура)

**4. Аннотация:**

Курс «Расчет, дизайн и методы изготовления интегрально-оптических компонентов для квантовых вычислительных систем» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Дисциплина обучает студентов современным методам создания интегральных оптических элементов и схем, ориентированных на использование при реализациях квантовых алгоритмов. В курсе будет рассмотрено моделирование интегральных оптических схем с использованием специализированного программного обеспечения

**5. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся (указывается согласно рабочему плану):**

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа, 2 часа коллоквиумов), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**6. Формируемые компетенции и входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:**

**НАЗВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ:**

СПК-1 Способность свободно владеть профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений.

СПК-2 Способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений.

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования.

## ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Для того чтобы формирование данных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению образовательной программы, должен:

- **ЗНАТЬ:** основные методы научно-исследовательской деятельности.
- **УМЕТЬ:** выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач.
- **ВЛАДЕТЬ:** навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования.

Для освоения дисциплины необходимы знания и умения, приобретаемые в рамках дисциплин общей физики «Оптика», «Электромагнетизм» и теоретической физики «Электродинамика». Желательно иметь навыки работы в MATLAB и/или python.

## **7. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий**

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего, часы	В том числе						
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
<b>1. Введение</b> Технологии интегральной оптики. Обзор современных применений интегральной оптики. Цикл разработки интегральных оптических устройств. Особые требования, налагаемые на интегральные оптические схемы, квантовыми применениями: квантовые алгоритмы с дискретными и непрерывными переменные оптического поля. Материалы интегральной оптики.		2			2	2 часа Знакомство с обзорами по теме интегральной оптики и её применений при реализации квантовых алгоритмов.		2

<p><b>2. Оптика волноводных структур</b>          Типы интегральных оптических волноводов. Собственные моды и постоянные распространения волноводов. Волноводные моды и радиационные моды. Частотная дисперсия волноводов, возникающая из составляющих их материалов, и дисперсия, обусловленная их геометрией. Одномодовые и многомодовые волноводы. Поляризационные состояния поля. Ортогональность собственных мод волноводов. Оптические потери в волноводах</p>	2	2		13	1 час Вывод уравнений для собственных мод и эффективным индексов мод.		1
<p><b>3. Методы конструирования интегральных оптических схем</b>          Метод конечных разностей во временной области (FDTD). Специализированные методы расчёта интегральных оптических структур. Программные пакеты для расчётов и моделирования интегральных оптических элементов и схем.          Представление планарных интегральных схем. Форматы файлов топологий планарных интегральных схем. Программные пакеты для создания топологий интегральных схем. Параметризованные ячейки для задания геометрий интегральных элементов.</p>	3	4	2 часа Коллоквиум по темам «Квантовая интегральная оптика»	6	4 часа Знакомство программными пакетами для расчётов и моделирования интегральных оптических элементов и схем.  2 часа Знакомство программными пакетами для рисования топологий интегральных оптических схем.		6

<p><b>4. Основные интегральные оптические элементы</b></p> <p>1-в-2-разветвитель и 2-в-1-объединитель сигналов. Направленный ответвитель. Интерферометр Маха-Цандера. Ввод и вывод сигналов в интегральную схему с помощью элементов тейпера (конуса) и решётки. Многомодовые интерференционные интегральные элементы. Интегральные оптические резонаторы. Представление функциональных характеристик интегральных оптических элементов в виде компактных моделей.</p> <p>Оптимизация параметров интегральных оптических элементов. Использование численных оптимизационных алгоритмов на примере разработки кремниевого 1-в-2-разветвителя с малыми потерями. Пример разработки кремниевого поляризационного делителя.</p> <p>Подходы к улучшению функциональных характеристик интегральных элементов. Примеры направленного поляризационного ответвителей с широкой рабочей спектральной полосой.</p>	4	4		6	<p>4 часа Моделирования в специализированной программе оптических характеристик интегральных оптических элементов. Создание компактной модели интегрального оптического элемента.</p> <p>3 часа Численная оптимизация интегрального оптического элемента.</p> <p>1 час Подготовка файла топологии интегральных оптических схем в специализированной программе.</p>	8
<p><b>5. Активные интегральные оптические схемы</b></p> <p>Реконфигурируемые интегральные оптические элементы. Подходы к изменению конфигурации интегральных оптических элементов. Интерферометр Маха-Цандера. Реконфигурируемые оптических схемы. Универсальные многоканальные интерферометры. Модуляторы света.</p>	3	2		6	<p>1 час Знакомство с программным пакетом для расчёта термо-и электрооптических эффектов.</p> <p>3 часа</p>	4

						Моделирование оптической схемы, перестраиваемой теплом.		
<b>6. Источники и детекторы квантовых сигналов</b> Излучение наноразмерного квантового эмиттера, помещённого в волновод. Задача генерации квантовых состояний с непрерывными переменными в интегральных оптических схемах. Интегрированный сверхпроводниковый детектор одиночных фотонов.		4	2			3 часа Моделирование квантового эмиттера, интегрированного в волновод.  3 часа Моделирование интегрального источника неклассических состояний с непрерывными переменными.  3 часа Моделирование интегрированного сверхпроводникового детектора.		9
<b>Промежуточная аттестация - зачет</b>			2		4	6 часов Подготовка к промежуточной аттестации (за-		6

						чету).		
<b>Итого</b>	<b>72</b>	18	16	2		36		36

\* Текущий контроль успеваемости в рамках занятий семинарского типа реализуется в форме обсуждения.

## 8. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине:

8.1 Основная и дополнительная литература доступна студентам через Интернет или по запросу лектору.

## 9. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Собственные моды волноводов
2. Требования, предъявляемые к квантовым интегральным оптическим схемам
3. Дисперсия материала и дисперсия структуры волновода
4. Общие и специальные численные методы для расчёта интегральных оптических элементов
5. Основные интегральные оптические элементы и их характеристики

Типовые вопросы к зачету:

1. Собственные моды прямых и изогнутых волноводов.
2. Реконфигурируемые интегральные оптические схемы
3. Интегральные оптические источники фотонов и неклассических состояний с непрерывными переменными
4. Сверхпроводниковые детекторы одиночных фотонов

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

**ВЛАДЕТЬ:** профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).

**ВЛАДЕТЬ:** навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).

**ВЛАДЕТЬ:** навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).

**УМЕТЬ:** анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).

**УМЕТЬ:** осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).

**УМЕТЬ:** организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3).

**ЗНАТЬ:** методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (З1, СПК-1).

**ЗНАТЬ:** способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (З2, СПК-2).

**ЗНАТЬ:** методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (З3, СПК-3).

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в



информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).		информации в области физики квантовых вычислений	физической информации в области физики квантовых вычислений	физической информации в области физики квантовых вычислений	области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений

<p><i>УМЕТЬ:</i> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>
<p><i>УМЕТЬ:</i> осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>

<p><i>УМЕТЬ:</i> организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>
<p><i>ЗНАТЬ:</i> методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (31, СПК-1)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>

<p><b>ЗНАТЬ:</b> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>
<p><b>ЗНАТЬ:</b> методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>

## 10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная литература

1. А. Снайдер, Д. Лав, Теория оптических волноводов // пер. с англ. Радио и связь, 1987.
2. L. Chrostowski, M. Hochberg, Silicon Photonics Design: from Devices to Systems // Cambridge University Press, 2015.
3. W. Bogaerts, L. Chrostowski, Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges // Las. & Photonics Rev., 1700237 (2018).
4. J.W Silverstone, D. Bonneau, J.L. O'Brien, M.G. Thompson, Silicon Quantum Photonics // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 22, No. 6, p. 390-402 (2016).

#### Дополнительная литература

1. W.R. Clements et al., Optimal design for universal multiport interferometers // Optica, vol. 3, No 12, p. 1460-1465 (2016).
2. F. Lenzini et al., Integrated photonic platform for quantum information with continuous variables // Sci. Advances, vol. 4, No 12, eaat9331 (2018).
3. M. Pant, D.R. Englund, M. Heuck, Apparatus and methods for single photon sources // US Patent application, 20180314131 (2018)
4. J. Mower et al., High-fidelity quantum state evolution in imperfect photonic integrated circuits // Phys. Rev. A., vol. 92, 032322 (2015).
5. C. Reimer et al., Generation of multiphoton entangled quantum states by means of integrated frequency combs // Science, vol. 351, No. 6278, p. 1176-1180 (2016).
6. N.C. Harris et al., Quantum transport simulations in a programmable nanophotonic processor // Nat. Photon, vol. 11, No 7, 447 (2017).
7. J.-H. Kim et al., Hybrid integration of solid-state quantum emitters on a silicon photonic chip // Nano Lett., vol. 17(12), p. 7394-7400 (2017).
8. J.P. Höpker et al., Towards integrated superconducting detectors on lithium niobite waveguides // arxiv:1708.06232 (2017).
9. O. Kahl et al., Waveguide integrated superconducting single-photon detectors with high internal quantum efficiency at telecom wavelengths // Sci. Reps., vol. 5, 10941 (2015).

#### **11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:**

#### **12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Для освоения дисциплины необходимо посещение интерактивных занятий (лекций и семинаров) и регулярная самостоятельная работа в течение семестра. Существенной частью курса является работа со специализированным программным обеспечением для выполнения численных расчётов, моделирования интегральных оптических элементов и схем и создании файлов топологий этих схем.

**13. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости):**

При реализации учебной работы в рамках дисциплины «Расчет, дизайн и методы изготовления интегрально-оптических компонентов для квантовых вычислительных систем» используются специализированные программы, которыми должны иметь возможность пользоваться обучающиеся. Основной частью курса является практическая работа на семинарах с использованием специализированных программ

**14. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Любая аудитория, оснащенная проекционным оборудованием с возможностью подключения к ноутбуку, экраном, и учебной доской. Семинарские занятия необходимо проводить в компьютерном классе с предустановленным специализированным программным обеспечением.