

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Основы волоконно-оптических систем связи

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

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

**4. Аннотация:**

Курс «Основы волоконно-оптических систем связи» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовая криптография и квантовая связь». Дисциплина обеспечивает подготовку студентов в области волоконно-оптической цифровой связи и дает представление о современных технологиях цифровых коммуникаций. В курсе разбираются как теоретические вопросы обработки и передачи информации, так и современная элементная база волоконно-оптических сетей, на которой строятся не только классические, но квантовые оптические системы связи.

**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» и «Электромагнетизм», а также дисциплин «Линейная алгебра» и «Математический анализ». Желательно также параллельно освоить дисциплину «Криптография и элементы теории информации».

## **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. История систем связи.</b> Развитие современных методов коммуникации. Оптическая связь. Тенденции роста скорости обмена данными. Различия между проводной и оптической связью.		1			1			

<p><b>2. Волоконные световоды.</b></p> <p>§1. Структура волоконных световодов. Движение света вдоль световода. Полное внутреннее отражение</p> <p>§2. Методы изготовления волоконных световодов. Изготовление заготовок для световодов. Методы химического осаждения из газовой фазы (CVD).</p> <p>§3. Типичный состав волоконных световодов. Контраст показателя преломления. Числовая апертура.</p> <p>§4. Одномодовые и многомодовые световоды. Уравнение распространения. Длина волны отсечки второй моды. Точное решение и Гауссово приближение для поля моды.</p> <p>§5. Спектральные характеристики кварцевых световодов. Потери в оптоволоконных линиях.</p> <p>§6. Дисперсия в световодах. Межмодовая дисперсия. Материальная дисперсия. Волноводная дисперсия.</p>	4	3		7	<p>2 часа Самостоятельное изучения технологии световодов, сохраняющих поляризацию (PANDA).</p> <p>4 часа Повторение лекционного материала по теме «волоконные световоды».</p>		6
--	---	---	--	---	---	--	---

<p><b>3. Традиционные системы оптической связи.</b></p> <p>§7. Модуляция типа ООК. Спектр модулированного сигнала. Преобразование Фурье. Сравнение систем RZ (импульсное кодирование) и NRZ (непрерывное кодирование). Проблемы, связанные с дисперсией световодов.</p> <p>§8. Спектральная эффективность канала. Квадратурная диаграмма. Фазовая модуляция (BPSK, QPSK). Амплитудно-фазовая модуляция (QAM). Квадратурное декодирование сигналов.</p> <p>§9. Телеком и датаком. Системы SONET/SDH.</p>	4	4		8	<p>1 час Вывод формулы для спектра прямоугольного импульса.</p> <p>1 час Самостоятельное изучение структуры данных кадра SONET/SDH</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по типам модуляции в оптоволоконных сетях.</p>	4
<p><b>4. Методы мультиплексирования в оптической связи</b></p> <p>§10. Спектральное уплотнение каналов (WDM). Сетка частот ITU. Защитные спектральные интервалы.</p> <p>§11. Временное уплотнение каналов (TDM). Система GPON.</p> <p>§12. Технология с кодовым разделением CDMA. Кодовые слова. Варианты оптической реализации.</p> <p>§13. Технология ортогонального спектрального мультиплексирования OFDM.</p>	4	2	2 часа Коллоквиум по волоконным световодам и системам связи.	8	<p>1 час Самостоятельное изучение параметров OFDM модуляции в беспроводных сетях WiFi, 4G LTE.</p> <p>7 часов Подготовка к коллоквиуму</p>	8

<p><b>5. Инструментарий волоконно-оптических линий связи</b></p> <p>§14. Простейшая линия связи на многомодовых световодах. Источники света, фотоприемники. Типы коммуникационных многомодовых световодов. Поперечные моды и фазовый объем излучения. Теорема Лиувилля.</p> <p>§15. Основные элементы системы связи. Источники света: VCSEL, DFB лазеры. Варианты модуляции сигнала: прямая токовая модуляция, электрооптические модуляторы, электроабсорбционные модуляторы. Фотоприемники: PIN диоды, лавинные диоды.</p> <p>§16. Спектральные мультиплексоры. AWG. Управление хроматической дисперсией. Компенсаторы дисперсии.</p> <p>§17 Эрбиевые усилители. Принципы действия. Скоростные уравнения. Коэффициент усиления. Пример расчета усилителя. Спектральные характеристики усилителя.</p> <p>§18. Пассивные компоненты ВОЛС. Светоделители, изоляторы, циркуляторы. Оптоволоконные разъемы.</p> <p>§19. Измерительное и монтажное оборудование. Сварка оптоволокон. Спектроанализаторы. Тестеры процента битовых ошибок.</p>	5	3		8	<p>1 час Самостоятельное изучение методов Рамановского усиления в ВОЛС.</p> <p>1 час Самостоятельное изучение нелинейных эффектов в ВОЛС. Усиление нелинейных эффектов вблизи точки нулевой дисперсии.</p>		2
<p><b>Промежуточная аттестация - зачет</b></p>		4		4	<p>16 часов Подготовка к промежуточной аттестации (зачету).</p>		16
<p><b>Итого</b></p>	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 доступная 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. Уравнения для профиля поля моды световода. Длина волны отсечки.
2. Дисперсия в волоконных световодах.
3. Типы модуляции данных. Когерентные и некогерентные варианты.
4. Спектральное и временное уплотнение каналов.
5. Кодовое разделение (CDMA)
6. Система модуляции OFDM на поднесущих.
7. Поперечные моды, фазовый объем и теорема Лиувилля.
8. Эрбиевые усилители и их применение.
9. Спектральные (де)мультиплексоры на базе AWG.
10. Электрооптические модуляторы фазы и интенсивности.

Типовые вопросы к зачету:

1. Структура волоконного световода. Числовая апертура и ее связь с контрастом показателя преломления.
2. Методы изготовления волоконных световодов и заготовок для них.
3. Уравнения для профиля поля моды. Приближенное решение в виде Гауссова пучка.
4. Длина волны отсечки второй моды. Уравнения для ее нахождения.
5. Спектральные характеристики потерь в волоконных световодах.
6. Дисперсия в многомодовых световодах. Типы многомодовых световодов.
7. Дисперсия в одномодовых световодах. Связь дисперсии с эффективным показателем преломления.
8. Модуляция типа ООК. Спектр модулированного сигнала.
9. Квадратурная фазовая и фазово-амплитудная модуляция
10. Устройство телекоммуникационных сетей. Система SONET/SDH.
11. Спектральное уплотнение каналов. Спектральная эффективность мультиплексированного канала.
12. Временное уплотнение каналов на примере системы GPON.

13. Система модуляции на поднесущих OFDM.
14. Технология кодового разделения CDMA.
15. Электрооптические модуляторы фазы и интенсивности. Устройство и принцип работы.
16. Спектральные (де)мультиплексоры на базе AWG.
17. Устройство эрбиевого усилителя для ВОЛС.
18. Скоростные уравнение и моделирование работы эрбиевых усилителей.
19. Оптический циркулятор и его применение.
20. Лазеры для оптической связи: VCSEL и DFB лазер. Устройство, принцип работы и применение.

## 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 (31, СПК-1).

ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, 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 информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и сис-	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной

систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).		научной информации в области физики квантовых вычислений	систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	тематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	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 (УЗ, 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</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</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>

		вычислений	квантовых вычислений		
<p><i>ЗНАТЬ:</i> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).</p>	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	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	Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений

<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)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	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	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	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
--	-------------------	--	--	--	---

## 10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная литература

1. В.Е.А. Saleh, М.С. Teich "Fundamentals of Photonics. 2<sup>nd</sup> edition.", John Wiley & Sons, Inc., 2007.
2. G. P. Agrawal "Fiber-Optic Communications Systems", Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
3. Г. Агравал "Нелинейная волоконная оптика" пер. с англ., Мир, 1996.

### Дополнительная литература

4. The mobile communication handbook (<http://www.ece.ubc.ca/~brucew/ebook/Mobile%20Communications%20Handbook.pdf>)
5. Orthogonal Frequency Division Multiplexing ([https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn\\_11fall/ofdm\\_new.pdf](https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn_11fall/ofdm_new.pdf))
6. Wikipedia (<https://www.wikipedia.org/>)

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

- The mobile communication handbook (<http://www.ece.ubc.ca/~brucew/ebook/Mobile%20Communications%20Handbook.pdf>)
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing ([https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn\\_11fall/ofdm\\_new.pdf](https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/media/wn_11fall/ofdm_new.pdf))
- Wikipedia (<https://www.wikipedia.org/>)

## **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.

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

- средства дистанционного сопровождения учебного процесса в форме сайта с избранными материалами лекций и семинарских занятий.
- лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования.

## **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.