Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе

_____ **П. Е. Троян**

«___» _____ 2017 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Волноводная фотоника и нанооптика

Уровень основной образовательной программы _____Магистратура_____

Направление подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Магистерская программа Оптические системы связи и обработки информации_____
(полное наименование профиля направления подготовки (специальности) из ПООП)

Форма обучения_____очная_____

Факультет _____Радиотехнический_____

Профилирующая кафедра Телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)

Обеспечивающая и выпускающая кафедра Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР)

Курс _____второй_____ **Семестр** __третий_____

Учебный план набора 2015 года и последующих лет.

Распределение рабочего времени:

№	Виды учебной работы	Семестр 1	Семестр 2	Семестр 3	Семестр 4	Всего	Единицы
1.	Лекции			18		18	часов
2.	Лабораторные работы			16		16	часов
3.	Практические занятия			22		22	часов
4.	Курсовой проект/работа (КРС) (аудиторная)		-			-	часов
5.	Всего аудиторных занятий (Сумма 1-4)			56		56	часов
6.	Из них в интерактивной форме			-		-	часов
7.	Самостоятельная работа студентов (СРС)			88		88	часов
8.	Всего (без экзамена) (Сумма 5,7)			144		144	часов
9.	Самост. работа на подготовку, сдачу экзамена			36		36	часов
10.	Общая трудоемкость (Сумма 8,9)			180		180	часов
	(в зачетных единицах)			5		5	ЗЕТ

Экзамен___третий _____ **семестр**

Томск 2017

Согласована на портале № 10313

Рассмотрена и одобрена на заседании кафедры
протокол № 5 от «22» 12 2016 г.

Рабочая программа составлена с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) четвертого поколения по направлению подготовки 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи (уровень магистратуры)", утвержденного 30 ноября 2014 г. №1403, рассмотрена и утверждена на заседании кафедры « » _____ г., протокол № ____.

Разработчик
Профессор кафедры СВЧиКР _____ В.М. Шандаров
(должность, кафедра) (подпись) (Ф.И.О.)

Зав. кафедрой СВЧиКР _____ С.Н. Шарангович
(должность, кафедра) (подпись) (Ф.И.О.)

Рабочая программа согласована с факультетом, профилирующей, обеспечивающей и выпускающей кафедрами направления подготовки.

Декан РТФ _____ К.Ю. Попова
(название факультета) (подпись) (Ф.И.О.)

Зав. профилирующей
кафедройТОР _____ А.Я. Демидов
(название кафедры) (подпись) (Ф.И.О.)

Зав. обеспечивающей и выпускающей
кафедрой СВЧиКР _____ С.Н. Шарангович
(название кафедры) (подпись) (Ф.И.О.)

Эксперты:
Доцент кафедры ТОР _____ С.И. Богомолов
место работы, занимаемая должность) (подпись) (Ф.И.О.)

Проф. кафедры СВЧиКР _____ АЕ. Мандель
(место работы, занимаемая должность) (подпись) (Ф.И.О.)

Согласована на портале № 10313

1. Цели и задачи дисциплины

Целью преподавания дисциплины является формирование у студентов современных физических и технических представлений о физических принципов функционирования современных волноводных элементов и устройств фотоники и нанооптики.

Основными задачами изучения дисциплины являются изучение основных положений волноводной фотоники, оптических и нелинейно-оптических эффектов при ограничении световых полей направляющими структурами с микронными и нанометровыми поперечными размерами, основных принципов построения волноводных приборов и систем оптической обработки информации.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина является дисциплиной по выбору вариативной части блока 1 (Б1.В.ДВ.2.1).

В свою очередь данный курс помимо самостоятельного значения необходим для изучения ряда дисциплин базового цикла и дисциплин по выбору, а также эффективного прохождения студентами производственной и научно-исследовательской практики и выполнения ВКР.

3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- способностью осваивать современные и перспективные направления развития ИКТиСС (ОПК-3),
- готовностью использовать современные достижения науки и передовые инфокоммуникационные технологии, методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в научно-исследовательских работах в области ИКТиСС (ПК-8),
- готовностью представлять результаты исследования в форме отчетов, рефератов, публикаций и публичных обсуждений, интерпретировать и представлять результаты научных исследований, в том числе на иностранном языке, готовностью составлять практические рекомендации по использованию результатов научных исследований (ПК-10).

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- основные принципы и физические эффекты, обеспечивающие распространение световых полей и преобразование их пространственно-временной структуры в диэлектрических направляющих элементах, в том числе с размерами субволнового масштаба;
- конструкции и области применения элементов и систем волноводной фотоники и нанооптики;

уметь:

- определять и обосновывать целесообразность использования волноводных фотонных структур и приборов нанооптики для работы в составе оптических систем передачи и обработки информации;
- применять на практике известные методы анализа и экспериментального исследования волноводных фотонных структур и элементов нанооптики на основе диэлектрических и полупроводниковых материалов;

владеть:

- методами расчета и анализа характеристик основных волноводных оптических и нанооптических элементов, а также оптических систем передачи и обработки информации.

Согласована на портале № 10313

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры			
		1	2	3	4
Аудиторные занятия (всего)	56			56	
В том числе:	-	-	-	-	-
Лекции	18			18	
Лабораторные работы (ЛР)	16			16	
Практические занятия (ПЗ)	22			22	
Семинары (С)	-			-	
Коллоквиумы (К)	-			-	
Курсовой проект/(работа) (аудиторная нагрузка)	-			-	
Другие виды аудиторной работы					
Самостоятельная работа (всего)	88			88	
В том числе:	-	-	-	-	-
Курсовой проект (работа) (самостоятельная работа)	-	-	-	-	-
Другие виды самостоятельной работы					
Вид промежуточной аттестации (экзамен)	36			36	
Общая трудоемкость час	180			180	
Зачетные Единицы Трудоемкости	5			5	

5. Содержание дисциплины

5.1. Разделы дисциплин и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекции	Лаборат. занятия	Практич. занятия.	Курсовой П/Р (КРС)	Самост. работа студента	Всего час. (без экзам)	Формируемые компетенции (ОК, ПК, ПСК)
1.	Электродинамический анализ распространения света в волноводных фотонных структурах	4	-	4	-	16	24	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
2.	Диэлектрические и полупроводниковые материалы волноводной фотоники	2	4	2	-	10	18	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
3.	Основные принципы нанооптики	2	-	2	-	16	20	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
4.	Основы нелинейной волноводной оптики	2	4	4	-	10	20	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
5.	Нелинейно-оптические преобразования пространственно-временной структуры световых полей в волноводных фотонных структурах	4	4	6	-	18	32	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
6.	Волноводные оптические и нанооптические элементы и структуры систем передачи и обработки информации	4	4	4	-	18	30	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
Итого		18	16	22		88	144	

Согласована на портале № 10313

5.2. Содержание разделов лекционного курса

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Трудоёмкость (час.)	Формируемые компетенции (ОК, ПК)
1.	Электродинамический анализ распространения света в волноводных фотонных структурах.	Типы волноводных фотонных структур. Моды изотропных и анизотропных планарных волноводов. Волновые уравнения и решения для направляемых мод. Дисперсионные уравнения для планарных волноводов с разными профилями показателя преломления. Системы связанных оптических волноводов. Дискретная дифракция света в многоэлементных волноводных структурах.	4	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
2.	Диэлектрические и полупроводниковые материалы волноводной фотоники.	Волноводные фотонные структуры на основе диэлектрических и полупроводниковых материалов. Области прозрачности, механизмы потерь в оптических волноводах, волноводные структуры для видимого и инфракрасного диапазонов длин волн.	2	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
3.	Основные принципы нанооптики.	Наноразмерные световые поля. Примеры нанополей. Преодоление дифракционного предела пространственного разрешенияв микроскопии. Нановолноводы. Плазмоны и поверхностный плазмонный резонанс.	2	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
4.	Основы нелинейной волноводной оптики.	Механизмы оптической нелинейности диэлектрических и полупроводниковых материалов. Керровская, тепловая и фоторефрактивная нелинейность. Особенности нелинейного отклика волноводных фотонных структур.	2	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
5.	Нелинейно-оптические преобразования пространственно-временной структуры световых полей в волноводных фотонных структурах.	Возможные нелинейно-оптические процессы в средах с квадратичной и кубичной нелинейностью. Генерация оптических гармоник, синхронная и квазисинхронная генерация гармоник, параметрическая генерация света, оптическое детектирование. Эффекты самофокусировки и самодефокусировки, пространственные оптические солитоны в фотонных структурах с керровской и насыщаемой нелинейностью. Лазеры с удвоением частоты. Эффекты вынужденного рамановского рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна. Генерация суперконтинуума в фотонно-кристаллических волноводах.	4	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
6.	Волноводные оптические и нано-оптические элементы и структуры систем передачи и обработки информации.	Волоконные световоды, интегрально-оптические модуляторы и переключатели, плазмонные волноводы, волноводные фотонные и плазмон-поляритонные сенсоры, волноводные нелинейно-оптические компоненты и приборы.	4	ОПК-3, ПК-8; ПК-10

Согласована на портале № 10313

5.3 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечивающими (предыдущими) и обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

№ п/п	Наименование обеспечивающих (предыдущих) и обеспечиваемых (последующих) дисциплин	№ № разделов данной дисциплины из табл.5.1, для которых необходимо изучение обеспечивающих (предыдущих) и обеспечиваемых (последующих) дисциплин					
		1	2	3	4	5	6
Предшествующие дисциплины							
1.	Оптические системы связи и обработки информации	-	+	+	+	+	+
2	Теория и техника передачи информации	-	+	+	+	+	+
Последующие дисциплины							
1.	Голографические фотонные структуры в наноструктурированных материалах	+	+	+	+	+	+

5.4. Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

Компетенции	Л	ЛР	П	СРС	Формы контроля
ОПК-3	+	+	+	+	Опрос на лекциях и практических занятиях, презентация с обсуждением
ПК-8	+	+	+	+	Опрос на лекциях и практических занятиях, презентация с обсуждением
ПК-10	+	+	+	+	Допуск к лабораторным работам, их выполнение Составление и защита отчётов по лабораторным работам.

Л – лекция, ЛР – лабораторная работа, П – практика, СРС – самостоятельная работа студента.

6. Методы и формы организации обучения

Для успешного освоения дисциплины применяются различные образовательные технологии, которые обеспечивают достижение планируемых результатов обучения согласно основной образовательной программе и с учетом требований к объёму занятий в интерактивной форме.

7. Лабораторный практикум

№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ	Трудоёмкость (час.)	ОК, ПК
2	Исследование оптического поглощения в разных материалах на длинах волн видимого и ИК диапазонов	4	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
4	Формирование фотонных дифракционных элементов в фоторефрактивном кристалле	4	
5	Формирование фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле	4	
6	Формирование пространственных оптических солитонов в сегнетоэлектрическом кристалле	4	

Согласована на портале № 10313

8. Практические занятия

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практических работ	Трудоемкость (час.)	ОК, ПК
1	1	Дисперсионное уравнение планарных волноводов с градиентным и ступенчатым профилями показателя преломления	4	ОПК-3, ПК-8; ПК-10
2	2	Расчет параметров волноводных фотонных элементов в ИК диапазоне длин волн света	2	
3	2, 4	Нелинейный отклик материалов с керровской и насыщаемой нелинейностью	4	
4	2, 4	Расчет эффективных нелинейных параметров волноводных фотонных элементов	4	
5	5,6	Расчет характеристик световых полей в системах связанных оптических волноводов	4	
6	6	Расчет характеристик волноводных модуляторов света	2	
7	2, 3	Расчет основных характеристик плазмонных волн в фотонных структурах «диэлектрик - проводник»	2	

9. Самостоятельная работа

№ п/п	Разделы дисциплины из табл. 5.1	Тематика самостоятельной работы *(детализация)*	Трудоемкость (час.)	Компетенции ОК, ПК	Контроль выполнения работы
1.	1, 2, 3, 4, 5, 6	Проработка лекционного материала. Темы контрольных работ: 1. Планарные волноводные фотонные структуры. 2. Пространственные оптические солитоны в среде с керровской нелинейностью. 3. Характеристики волноводных электрооптических модуляторов света.	18	ОПК-3, ПК-8; ПК-10	Конспект. Контрольные работы. Экзамен.
2.	1, 2, 3, 4, 5, 6	Подготовка к практическим занятиям	24	ОПК-3, ПК-8; ПК-10	Опрос. Расчетные задания. Экзамен.
3.	2, 4, 5, 6	Подготовка к лабораторным работам, оформление отчётов	18	ОПК-3, ПК-8; ПК-10	Допуск и отчет по ЛР. Экзамен
4		Подготовка материалов и выполнение индивидуальных творческих заданий (презентации)	28	ОПК-3, ПК-8; ПК-10	Презентация, выступление на семинаре.

Темы творческих заданий (презентаций):

1. Фотонно-кристаллические волокна: особенности, применения
2. Волноводно-оптические компоненты на основе кремния
3. Оптические резонаторы на основе мод шепчущей галереи
4. Генераторы суперконтинуума
5. Интегрально-оптические компоненты систем обработки информации
6. Фоторефрактивные кристаллические материалы
7. Ближнепольная оптическая микроскопия
8. Конфокальный оптический микроскоп
9. Атомно-силовые микроскопы
10. Пространственные оптические солитоны в планарных волноводных структурах

Согласована на портале № 10313

Требования к презентациям

Презентация оформляется с использованием средств Microsoft Office, она должна содержать постановку задачи, основную часть, заключение, список использованных источников. В списке источники (книги, статьи, патенты) приводить с указанием полных выходных данных и с номером в квадратных скобках по тексту. Время на презентацию 10 мин.

10. Примерная тематика курсовых проектов (работ)

Курсовое проектирование по дисциплине не предусмотрено учебным планом.

11. Балльно-рейтинговая система

МЕТОДИКА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Осуществляется в соответствии с **Положением о порядке использования рейтинговой системы для оценки успеваемости студентов** (приказ ректора 25.02.2010 № 1902) и основана на балльно-рейтинговой системе оценки успеваемости, которая включает **текущий** контроль выполнения элементов объема дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга.

Правила формирования пятибалльных оценок за каждую контрольную точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТх\big|_{x=1,2} = \frac{(Сумма_баллов, _набранная_к_КТх) * 5}{Требуемая_сумма_баллов_по_балльной_раскладке}$$

Итоговый контроль освоения дисциплины осуществляется на экзамене по традиционной пятибалльной шкале. Обязательным условием перед сдачей экзамена является выполнение студентом необходимых по рабочей программе для дисциплины видов занятий: выполнение и защита результатов лабораторных работ, сдача контрольных работ.

Экзаменационный билет содержит два вопроса и задачу. Максимальная оценка за каждый вопрос и задачу составляет 10 баллов, . Максимальная экзаменационная оценка составляет 30 баллов. Экзаменационная составляющая менее 10 баллов – несдача экзамена, требует повторной пересдачи в установленном порядке.

Таблица 11.1 Распределения баллов в течение семестра

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую контрольную точку с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Посещение занятий	3	3	4	**10**
Тестовые контрольные работы на практических занятиях	8	8	8	**24**
Выполнение и защита результатов лабораторных работ		12	12	**24**
Компонент своевременности	4	4	4	**12**
Итого максимум за период:	**15**	**27**	**28**	**70**
Сдача экзамена (максимум)				**30**
Нарастающим итогом	**15**	**42**	**70**	**100**

Таблица 11.2 Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Баллы на дату контрольной точки	Оценка
≥ 90 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	5

Согласована на портале № 10313

От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ	3
< 60 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	2

Таблица 11.3 Пересчет итоговой суммы баллов в традиционную международную оценку

Оценка (ГОС)	**Итоговая сумма баллов (учитывает успешно сданный экзамен)**	**Оценка (ECTS)**
5 (отлично)	**90-100**	A (отлично)
4 (хорошо)	**85-89**	B (очень хорошо)
	75-84	C (хорошо)
	70-74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно)	**65-69**	
	60-64	E(посредственно)
2(неудовлетворительно)	**Ниже 60 баллов**	F (неудовлетворительно)

Преобразование суммы баллов в традиционную оценку и в международную буквенную оценку происходит один раз в конце семестра после подведения итогов изучения дисциплины(успешной сдачи экзамена).

Согласована на портале № 10313

12. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. В.М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики. - Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2012. - 197 с. Режим доступа: **http://edu.tusur.ru/training/publications/750**
2. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника [Электронный ресурс]: учеб пособие. - СПб. : Лань, 2011. - 528 с. Режим доступа: **http://e.lanbook.com/view/book/690**.

б) дополнительная литература:

3. А. Ярив. Введение в оптическую электронику: Пер. с англ.- М.: ВШ.;1983.-398 с. **(3)**
4. С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах. - Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. - 230 с. **(30)**
5. Башкиров А. И. Оптические и акустооптические системы обработки информации: Учебное пособие / Башкиров А. И. – 2012. 100 с. [Электронный ресурс] - http://edu.tusur.ru/training/publications/1819
6. Информационная оптика / Под ред. Н.Н. Евтихеева. Учебное пособие – М., Издательство МЭИ, 2000. - 516 с. (экз. - **19**)

в) учебно-методическое обеспечение

7. В. М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов специальности 210401.65, [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2013. – 57 с. Режим доступа: http://edu.tusur.ru/training/publications/2888/
8. Шандаров В. М., Тренихин П.А. Исследование дифракции светового пучка в среде с периодической модуляцией показателя преломления: [Электронный ресурс]: Методические указания к лабораторной работе для студентов – 2011, 7 с. Режим доступа: http://edu.tusur.ru/training/publications/72
9. Кущ Г. Г., Шандаров В. М. Исследование эффективности ввода света в планарный оптический волновод: [Электронный ресурс]: Методические указания к лабораторной работе / – 2011. 18 с. Режим доступа: http://edu.tusur.ru/training/publications/123
10. Каншу А. В., Шандаров В. М. Исследование периодических фазовых оптических элементов формируемых некогерентным источником света в кристалле linbo3 легированном фотрефрактивными примесями: [Электронный ресурс]: Методические указания к лабораторной работе для студентов – 2011, 8 с. Режим доступа: http://edu.tusur.ru/training/publications/74
11. Карпушин П. А., Шандаров В. М. Исследование эффекта пространственного самовоздействия световых пучков в фоторефрактивном кристалле: [Электронный ресурс]: Методические указания к лабораторной работе для студентов – 2011, 14 с. Режим доступа: http://edu.tusur.ru/training/publications/75

г) Перечень интернет-ресурсов

1. Springer Journals – полнотекстовая коллекция электронных журналов издательства Springer. http://link.springer.com/
2. Образовательный портал в свободном доступе: «Физика, химия, математика студентам и школьникам. Образовательный проект А.Н. Варгина» . http://www.ph4s.ru/;
3. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU http://elibrary.ru/defaultx.asp;
4. Optical Society of America; OpticsInfoBase, доступ с IP адресов ТУСУРа (“Applied Optics”, “Optics Express”, “J. Opt. Technol.” и др.) http://www.opticsinfobase.org/;
5. Полнотекстовая БД диссертаций РГБ http://rsl.ru;
6. Словари и справочники издательства Оксфордского университета http://www.oxfordreference.com/pub/views/home.html;
7. Университетская информационная система Россия http://uisrussia.msu.ru/is4/-main.jsp;

Согласована на портале № 10313

8. Архив электронных препринтов http://xxx.lanl.gov.

д) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

17. Сайт кафедры СВЧиКР на образовательном портале ТУСУРа;
18. Локальная сеть кафедры СВЧиКР: Students\Фамилия преподавателя\ Название файла.

13. Материально-техническое обеспечение дисциплины.

Лабораторные работы проводятся в специализированных лабораториях кафедры СВЧиКР: ауд. 329 б РК, 333 а РК. В Лаборатории 333 а выполняются работы по исследованию оптического поглощения в диэлектрических и полупроводниковых материалах. В лаборатории 329 б РК выполняются работы по исследованию эффектов формирования дифракционных, волноводных элементов и пространственных оптических солитонов в фоторефрактивных кристаллах и оптических волноводах.

14. Методические рекомендации по организации изучения дисциплины.

Объём часов, предусмотренных учебным планом для изучения дисциплины, позволяет осветить только наиболее важные моменты и раскрыть базовые понятия при чтении лекций. Поэтому при реализации программы студенты должны работать самостоятельно как при повторении лекционного материала, так и при подготовке к лабораторным и практическим занятиям, к написанию реферата. Для обеспечения эффективного усвоения студентами материалов дисциплины необходимо на первом занятии познакомить их с основными положениями и требованиями рабочей программы, с подлежащими изучению темами, списком основной и дополнительной литературы, с положениями балльно-рейтинговой системы оценки успеваемости. На лекциях необходимо обращать внимание на особенности применения рассматриваемого материала в последующих курсах, а также в будущей профессиональной деятельности. В учебном процессе следует применять интерактивные методы обучения для увеличения заинтересованности студентов и повышения их компетенций.

Согласована на портале № 10313

высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ П.Е. Троян
«___» _____ 2017 г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

«Волноводная фотоника и нанооптика»

Уровень основной образовательной программы: Магистратура

Направление(я) подготовки (специальность): 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Профиль(и): Оптические системы связи и обработки информации

Форма обучения ОЧНАЯ

Факультет Радиотехнический

Кафедра Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР)

Курс 2 **Семестр 3**

Учебный план набора 2015 года.

Зачет _____ семестр **Диф. зачет _____ семестр**

Экзамен 3 семестр

Томск 2017

Введение

Согласована на портале № 10313

Фонд оценочных средств (ФОС) является приложением к рабочей программе дисциплины «**Волноводная фотоника и нанооптика**» и представляет собой совокупность контрольно-измерительных материалов (типовые задачи (задания), контрольные работы, тесты и др.) и методов их использования, предназначенных для измерения уровня достижения студентом установленных результатов обучения.

ФОС по дисциплине используется при проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов.

Перечень закрепленных за дисциплиной компетенций приведен в таблице 1

Таблица 1 – Перечень закрепленных за дисциплиной компетенций

Код	Формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции
ОПК-3	способность осваивать современные и перспективные направления развития ИКТиСС	**Должен знать** физические принципы работы и математическое описание явлений распространения света в волноводных структурах; классификацию оптических явлений в однородной среде и волноводных оптических системах; направления развития волноводной оптики и нанооптики. **Должен уметь** выполнять расчеты, связанные с определением параметров оптических волноводных элементов, устройств и систем. **Должен владеть** методами анализа и расчета основных компонентов и узлов приборов фотоники, в том числе на основе нелинейно-оптических эффектов, а также иметь представление о методах компьютерной оптимизации характеристик таких устройств.
ПК-8	готовность использовать современные достижения науки и передовые инфокоммуникационные технологии, методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в научно-исследовательских работах в области ИКТиСС	**Должен знать** текущее состояние и перспективы построения инфокоммуникационных систем на основе последних достижений в области физики, техники и технологий фотоники. **Должен уметь** проводить компьютерное моделирование и проектирование волноводных фотонных компонентов, устройств и систем. **Должен владеть** навыками расчета, проектирования и компьютерного моделирования волноводных фотонных компонентов.
ПК-10	готовность представлять результаты исследования в форме отчетов, рефератов, публикаций и публичных обсуждений, интерпретировать и представлять результаты научных исследований, в том числе на иностранном языке, готовность составлять практические рекомендации	**Должен знать** принципы построения и работы компонентов, приборов и систем фотоники на основе волноводных эффектов и компонентов. **Должен уметь** пользоваться справочными данными фирм-производителей оптических и оптоэлектронных компонентов при проектировании оптических волноводных приборов и систем. **Должен владеть** навыками изложения и представления результатов исследований и проектов оптических инфокоммуникационных систем, в том числе на иностранном языке.

Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции на всех этапах приведены в таблице 2.

Согласована на портале № 10313

Таблица 2 – Общие характеристики показателей и критериев оценивания компетенции по этапам

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Обладает фактическим и теоретическим знанием в пределах изучаемой области с пониманием границ применимости.	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для развития творческих решений, абстрагирования проблем.	Контролирует работу, проводит оценку, совершенствует действия работы.
Хорошо (базовый уровень)	Знает факты, принципы, процессы, общие понятия в пределах изучаемой области.	Обладает диапазоном практических умений, требуемых для решения определенных проблем в области исследования.	Берет ответственность за завершение задач в исследовании, приспосабливает свое поведение к обстоятельствам в решении проблем.
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Обладает базовыми общими знаниями.	Обладает основными умениями, требуемыми для решения простых задач.	Работает при прямом наблюдении.

2. Реализация компетенций

1. Компетенция ОПК-3

ОПК-3: способность осваивать современные и перспективные направления развития ИКТиСС.
Для формирования компетенции необходимо осуществить ряд этапов.
Этапы формирования компетенции, применяемые для этого виды занятий и используемые средства оценивания представлены в таблице 3.

Таблица 3–Этапы формирования компетенции и используемые средства оценивания

Состав	Знать	Уметь	Владеть
Содержание этапов	Физические принципы работы и математическое описание явлений распространения света в волноводных структурах; классификацию оптических явлений в однородной среде и волноводных оптических системах; направления развития волноводной оптики и нанооптики.	Выполнять расчеты, связанные с определением параметров оптических волноводных элементов, устройств и систем.	Методами анализа и расчета основных компонентов и узлов приборов фотоники, в том числе на основе нелинейно-оптических эффектов, а также иметь представление о методах компьютерной оптимизации характеристик таких устройств.
Виды занятий	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.
Используемые средства оценивания	Задачи. Экзамен.	Задачи. Экзамен.	Задачи. Экзамен.

Формулировка показателей и критериев оценивания данной компетенции приведена в таблице 4.

Согласована на портале № 10313

Таблица 1 – Показатели и критерии оценивания компетенции на этапах

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Знает физические принципы работы и математическое описание явлений распространения света в волноводных структурах; классификацию оптических явлений в однородной среде и волноводных оптических системах; направления развития волноводной оптики и нанооптики.	Выполняет расчеты, связанные с определением параметров оптических волноводных элементов, устройств и систем.	Свободно владеет методами анализа и расчета основных компонентов и узлов приборов фотоники, в том числе на основе нелинейно-оптических эффектов, а также иметь представление о методах компьютерной оптимизации характеристик таких устройств.
Хорошо (базовый уровень)	Понимает связи между принципами работы волноводных элементов, направления развития волноводной оптики и нанооптики.	Понимает суть подходов, используемых при расчетах параметров волноводных оптических элементов, устройств и систем.	Владеет навыками работы с литературными источниками, подходами к анализу и проектированию оптических устройств и систем.
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Дает определения основных понятий в области оптики и информационно-коммуникационных систем.	Умеет работать со справочной литературой; умеет представлять результаты своей работы.	Может представить информацию, связанную с построением информационно-коммуникационных систем.

2. Компетенция ПК-8

ПК-8: готовность использовать современные достижения науки и передовые инфокоммуникационные технологии, методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в научно-исследовательских работах в области ИКТиСС.
Для формирования компетенции необходимо осуществить ряд этапов.
Этапы формирования компетенции, применяемые для этого виды занятий и используемые средства оценивания представлены в таблице 5.

Таблица 5–Этапы формирования компетенции и используемые средства оценивания

Состав	Знать	Уметь	Владеть
Содержание этапов	Текущее состояние и перспективы построения инфокоммуникационных систем на основе последних достижений в области физики, техники и технологий фотоники.	Проводить компьютерное моделирование и проектирование волноводных фотонных компонентов, устройств и систем.	Навыками расчета, проектирования и компьютерного моделирования волноводных фотонных компонентов.
Виды занятий	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.

Согласована на портале № 10313

Используемые средства оценивания	Задачи. Экзамен.	Задачи. Экзамен.	Задачи. Экзамен.

Формулировка показателей и критериев оценивания данной компетенции приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Показатели и критерии оценивания компетенции на этапах

Показатели и критерии	**Знать**	**Уметь**	**Владеть**
Отлично (высокий уровень)	Знает настоящее состояние и перспективы построения инфокоммуникационных систем на основе последних достижений в области физики, техники и технологий фотоники.	Умеет проводить компьютерное моделирование и проектирование волноводных фотонных компонентов, устройств и систем.	Свободно владеет навыками расчета, проектирования и компьютерного моделирования волноводных фотонных компонентов.
Хорошо (базовый уровень)	Понимает связи между характеристиками элементов волноводной фотоники и систем передачи и обработки информации с их использованием.	Умеет проводить компьютерное моделирование и проектирование ограниченного класса волноводных фотонных компонентов.	Владеет навыками расчета, проектирования и компьютерного моделирования линейных характеристик фотонных компонентов.
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Дает определения основных понятий в области волноводной фотоники.	Умеет работать со справочной литературой по проектированию волноводных фотонных компонентов.	Имеет представление о методах моделирования характеристик и проектирования фотонных компонентов.

3. Компетенция ПК-10

ПК-10: готовность представлять результаты исследования в форме отчетов, рефератов, публикаций и публичных обсуждений, интерпретировать и представлять результаты научных исследований, в том числе на иностранном языке, готовность составлять практические рекомендации.
Для формирования компетенции необходимо осуществить ряд этапов.
Этапы формирования компетенции, применяемые для этого виды занятий и используемые средства оценивания, представлены в таблице 7.

Таблица 7–Этапы формирования компетенции и используемые средства оценивания

Состав	Знать	Уметь	Владеть
Содержание этапов	**Должен знать** принципы построения и работы компонентов, приборов и систем фотоники на основе волноводных эффектов и компонентов.	**Должен уметь** пользоваться справочными данными фирм-производителей оптических и оптоэлектронных компонентов при проектировании оптических волноводных приборов и систем.	**Должен владеть** навыками изложения и представления результатов исследований и проектов оптических инфокоммуникационных систем, в том числе на иностранном языке.

Согласована на портале № 10313

Виды занятий	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.	Практические занятия. Самостоятельная работа студентов.
Используемые средства оценивания	Задачи. Экзамен.	Задачи. Экзамен.	Задачи. Экзамен.

Формулировка показателей и критериев оценивания данной компетенции приведена в таблице 8.

Таблица 8 – Показатели и критерии оценивания компетенции

Показатели и критерии	Знать	Уметь	Владеть
Отлично (высокий уровень)	Знает принципы построения и работы компонентов, приборов и систем фотоники на основе волноводных эффектов и компонентов.	Умеет пользоваться справочными данными фирм-производителей оптических и оптоэлектронных компонентов при проектировании оптических волноводных приборов и систем.	Владеет навыками изложения и представления результатов исследований и проектов оптических инфокоммуникационных систем, в том числе на иностранном языке.
Хорошо (базовый уровень)	Понимает связи между принципами работы компонентов и приборов фотоники и характеристиками ИКТ систем.	Умеет самостоятельно определять методы решения задач проектирования ИКТ систем.	Владеет навыками работы с литературными источниками в области волноводной фотоники.
Удовлетворительно (пороговый уровень)	Имеет представление о принципах работы фотонных компонентов и приборов.	Может решать некоторые задачи проектирования волноводных компонентов фотоники. .	Имеет представление о функциональных и структурных схемах волноводных систем фотоники.

3.Типичные контрольные задания

Для реализации вышеперечисленных задач обучения используются следующие материалы:

- контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, в составе:

Контрольные задачи (типичные) по элементарным знаниям и практическим навыкам по темам:

3.1. ТЕМА: Дисперсионное уравнение планарных волноводов с градиентным и ступенчатым профилями показателя преломления.

Задача 1.

Найдите критическую толщину волноводного слоя для направляемой TE_3 моды тонкопленочного асимметричного волновода, если он представляет собой пленку стекла с показателем преломления n_1=1,6, нанесенную на подложку из стекла с показателем преломления n_1=1,5. Длина волны света λ=1,5 мкм.

Согласована на портале № 10313

Решение:
Используя соотношение (4.3), найдем:

$$h_{kp} = \frac{3\pi - arctg\sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2 - n_1^2}}}{k_0\sqrt{n_0^2 - n_1^2}} = \frac{3\pi - arctg\sqrt{\frac{1{,}5^2 - 1}{1{,}6^2 - 1{,}5^2}}}{2\pi\sqrt{1{,}6^2 - 1{,}5^2}}\lambda = \frac{3.352\pi}{2\pi \cdot 0.557}\lambda = 3\lambda .$$

Таким образом, критическая толщина волноводного слоя для TE_3 моды равна 4,5 мкм.

3.2. ТЕМА: Расчет параметров волноводных фотонных элементов в ИК диапазоне длин волн света

Задача 1
Найдите критическую толщину волноводного слоя для направляемой TE_0 моды тонкопленочного асимметричного волновода, если он представляет собой пленку кремния с показателем преломления n_0=3,456, нанесенную на подложку из плавленого кварца с показателем преломления n_1=1,46. Длина волны света λ=2,0 мкм. Покровной средой является воздух.

3.3. Тема: Нелинейный отклик материалов с керровской и насыщаемой нелинейностью

Дифракционная эффективность фоторефрактивной решетки составляет 10%. Оценить величину поля пространственного заряда E_{sc}, если решетка сформирована в пластине ниобата лития толщиной 1 мм, вектор решетки параллелен оси Z, считывание осуществляется излучением He-Ne лазера с обыкновенной поляризацией, а период решетки равен 5 мкм. Справка: Величины обыкновенного и необыкновенного показателей преломления на данной длине волны составляют 2,286 и 2,2; а электрооптических коэффициентов r_{13}=9,6·10^{-10} см/В; r_{33}=30,9·10^{-10} см/В.

Решение:
Дифракционная эффективность решетки определяется формулой Когельника

$\eta = sin^2\left(\frac{\pi\,\Delta}{\lambda\ cos\,\theta}\right)$, где L – толщина решетки; Δn – изменение показателя преломления материала; λ- длина волны света; θ - угол Брэгга. Из этого соотношения найдем величину Δn, а поле пространственного заряда определим из условия, что изменение показателя преломления материала обусловлено линейным электрооптическим эффектом. В этом случае, имея в виду, что поляризация считывающего света соответствует обыкновенной волне, $\Delta n = -0.5 \cdot n^3 r_{31} E_{sc}$, где n – показатель преломления ниобата лития для обыкновенной волны.

3.4. Тема: Расчет эффективных нелинейных параметров волноводных фотонных элементов

Задача 1.
Круговой гауссов пучок имеет полуширину перетяжки w_0=10 мкм. Найдите полуширину пучка на расстоянии 10 м от области перетяжки, если длина волны света λ=1 мкм.

Решение:
Используем выражение для связи полуширины пучка в произвольном сечении с его шириной в области перетяжки:

Согласована на портале № 10313

$w^2(z) = w_0^2\left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right)$ и соотношение для продольного размера перетяжки $z_0 = \frac{\tau w_0^2}{\lambda}$.

Комбинируя их, получим: $w(z) = w_0\left(1 + \frac{z^2\lambda}{\pi w_0^4}\right)^{1/2}$. И, подставляя сюда заданные параметры, получим $w=w_0(1+10^9)^{0,5}=3,2$ см.

3.3. ТЕМА: Механизмы нелинейно-оптического отклика диэлектрических сред, нелинейное волновое уравнение, пространственные оптические солитоны.

Задача 1.

Линейно поляризованная световая волна распространяется в направлении оси X кристалла ниобата лития. Найти величину изменения показателя преломления, если к электродам, нанесенным на грани кристалла, перпендикулярные оси Z (толщина кристалла в этом направлении – 1 см), приложено электрическое напряжение в 1 кВ. Плоскость поляризации света совпадает с плоскостью XOY, длина волны света λ=633 нм.

Справка: Величины обыкновенного и необыкновенного показателей преломления на данной длине волны составляют 2,286 и 2,2; а электрооптических коэффициентов r_{13}=9,6·10^{-10} см/В; r_{33}=30,9·10^{-10} см/В.

Решение:

Поскольку световая волна распространяется вдоль оси X, а плоскость поляризации света совпадает с плоскостью XOY, то она соответствует обыкновенной волне в кристалле. Величина изменения показателя преломления за счет линейного электрооптического эффекта в случае обыкновенной поляризации света и управляющего электрического поля, приложенного вдоль оси Z, как следует из (5.8), определяется соотношением:

$$\Delta n_1 = -\frac{1}{2} n_0^3 \cdot r_{13} \cdot E_3$$

Подставляя в это выражение заданные значения обыкнвенного показателя преломления, соответствующего электрооптического коэффициента, электрического напряжения и толщины кристаллического образца, получим:

$$\Delta n_1 = -\frac{1}{2} 2.286^3 \cdot 9.6 \cdot 10^{-10} \cdot 10^3 = 5,734 \cdot 10^{-6}$$

Таким образом, величина изменения обыкновенного показателя преломления составляет в данном случае 5.734·10^{-6}.

3.4. ТЕМА: Оптические солитоны в волоконных световодах.

Задача 1.

Найдите число направляемых ТЕ мод, которые могут распространяться в симметричном планарном волноводе на длине волны света λ=0,5 мкм, если он представляет собой пластинку из стекла толщиной 5 мкм с показателем преломления n=1,5.

Решение:

Для симметричного планарного волновода дисперсионное уравнение в случае высшей ТЕ-моды, для которой может достигаться отсечка, принимает вид:

$k_0 h\sqrt{n_0^2 - n_2^2} = m\pi$. Действительно, в случае симметричного волновода $n_1=n_2$, а условие отсечки наблюдается при $N_m=n_2$. Отсюда выразим порядок моды m: $m = \frac{2}{\lambda} h\sqrt{n_0^2 - n_2^2}$

или, подставляя сюда параметры структуры и длину волны света, получим m=20·1,118=22,36. Таким образом, в данном волноводе могут распространяться 22 ТЕ-моды.

Согласована на портале № 10313

3.5. ТЕМА: Фоторефрактивные пространственные солитоны.

Задача 1.
Дифракционная эффективность фоторефрактивной решетки составляет 10%. Оценить величину поля пространственного заряда E_{sc}, если решетка сформирована в пластине ниобата лития толщиной 1 мм, вектор решетки параллелен оси Z, считывание осуществляется излучением He-Ne лазера с обыкновенной поляризацией, а период решетки равен 5 мкм.

Задача 2.
Дифракционная эффективность фоторефрактивной решетки составляет 1%. Оценить величину поля пространственного заряда E_{sc}, если решетка сформирована в пластине ниобата лития толщиной 1 мм, вектор решетки параллелен оси Z, считывание осуществляется излучением He-Ne лазера с необыкновенной поляризацией, а период решетки равен 3 мкм.

3.5. ТЕМА: Периодические волноводные структуры и дискретные пространственные солитоны.

Задание на практическое занятие («Оптические солитоны»)
Провести компьютерный анализ характеристик линейной дискретной дифракции световых пучков в периодической волноводной структуре с ее дополнительной периодической модуляцией (режим **second array**) при возбуждении света в разных элементах волноводной структуры.

Параметры для моделирования:
1. Время диффузии примеси t=0,5 часа.
2. Изменение показателя преломления в области волновода $\Delta n=0{,}001$.
3. Ширина волновода 5 мкм.
4. Расстояние между волноводами – 5 мкм.

Для модулирующей решетки
5. Ширина волновода 20 мкм.
6. Расстояние между волноводами – 20 мкм.
7. Изменение показателя преломления в области волновода $\Delta n=0{,}0001$; $\Delta n=0{,}0005$.

Параметры возбуждающего светового поля:
1. Длина волны света – 0, 532 мкм.
2. Интенсивность света – 1.
3. Число максимумов в профиле пучка – 1 (гауссово распределение).
4. Направление распространения света – вдоль волноводных элементов.
5. Полуширина пучка – 2.5 мкм.

Указания:
1. Получить и сохранить картины распределения интенсивности света в периодической волноводной структуре и в модулированной структуре при возбуждении света в разных (0, 1, 2, 3) ее элементах.
2. Оформить результаты моделирования в виде отчета.

4. Темы самостоятельной работы студентов

4.1. Введение – история вопроса. Оптические волноводы.
4.2. Механизмы нелинейно-оптического отклика диэлектрических сред, нелинейное волновое уравнение, пространстве-нные оптические солитоны.
4.3. Оптические солитоны в волоконных световодах

Согласована на портале № 10313

4.4 Фоторефрактивные пространственные солитоны
4.5. Вихревые, векторные пространственные солитоны
4.6. Периодические волноводные структуры и дискретные пространственные солитоны

5. Темы лабораторных работ

Лабораторные работы учебным планом не предусмотрены

6. Экзаменационные вопросы

1. Понятие углового спектра плоских волн. Параболическое уравнение в теории дифракции. Гауссовы световые пучки, основные параметры гауссова пучка.
2. Планарные оптические волноводы. Связанные оптические волноводы. Распространение световых волн в периодических структурах.
3. Условия проявления оптической нелинейности среды. Нелинейные восприимчивости.
4. Среда с квадратичной оптической нелинейностью. Возможные нелинейно-оптические эффекты в такой среде.
5. Среда с кубичной оптической нелинейностью. Возможные нелинейно-оптические эффекты в такой среде.
6. Распространение светового пучка в нелинейно-оптической среде. Нелинейное уравнение Шредингера.
7. Понятие временных и пространственных солитонов. Светлые и темные солитоны. Условия достижения солитонного режима.
8. Понятие керровской оптической нелинейности, выражение для показателя преломления такой среды.
9. Понятие и суть термооптической нелинейности среды.
10. Фоторефрактивная оптическая нелинейность. Суть дрейфового механизма транспорта носителей заряда, выражение для поля пространственного заряда при дрейфовом механизме.
11. Фоторефрактивная оптическая нелинейность. Суть фотовольтаического механизма транспорта носителей заряда, выражение для поля пространственного заряда при фотовольтаическом механизме.
12. Пространственные оптические солитоны в среде с керровской оптической нелинейностью.
13. Пространственные оптические солитоны в среде с фоторефрактивной оптической нелинейностью.
14. Материалы, в которых исследовались фоторефрактивные пространственные солитоны.
15. Основные экспериментальные схемы, используемые при изучении фоторефрактивных пространственных солитонов.
16. Временные оптические солитоны. Фундаментальный солитон и солитоны высших порядков.
17. Использование режима временных солитонов в оптических линиях связи.
18. Оптические вихри. Понятие вихревых солитонов. Среда, в которой могут наблюдаться вихревые солитоны. Схемы и результаты экспериментов по наблюдению вихревых солитонов.
19. Понятие векторных солитонов. Неогерентно и когерентно связанные векторные солитоны. Схема эксперимента по наблюдению векторных солитонов.
20. Понятие параметрических солитонов. Условия, в которых могут быть реализованы параметрические солитоны.
21. Многоэлементные волноводно-оптические системы. Понятие дискретных пространственных солитонов. Материалы, использовавшиеся в экспериментальных исследованиях. Основные экспериментальные схемы и типичные результаты по реализации эффектов дискретных пространственных солитонов.

Согласована на портале № 10313

7. Методические материалы

Для обеспечения процесса обучения и решения задач обучения используются следующие материалы для оценивания знаний и характеризующие этапы формирования компетенций (все методические материалы приведены в п.12 программы):

1. С.М. Шандаров. Введение в нелинейную оптику . – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2012. – 41 с. Режим доступа: **http://edu.tusur.ru/training/publications/2059**
2. С.М.Шандаров, В.М.Шандаров, А.Е.Мандель, Н.И.Буримов. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, , [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2012. – 244 с. Режим доступа: **http://edu.tusur.ru/training/publications/1553**
3. В.М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. Режим доступа: **http://edu.tusur.ru/training/publications/750**
4. В. М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов специальности 210401.65, [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2013. – 57 с. Режим доступа: **http://edu.tusur.ru/training/publications/2888/**

Согласована на портале № 10313