

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА И ГОЛОГРАФИЯ

Методические указания к практическим занятиям
и по самостоятельной работе
для студентов направлений «Электроника и наноэлектроника» и
«Фотоника и оптоинформатика»

Шандаров, Станислав Михайлович
Бородин, Максим Викторович

Когерентная оптика и голография: методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для студентов направлений «Электроника и наноэлектроника» и «Фотоника и оптоинформатика» / С.М. Шандаров, М.В. Бородин; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. – Томск : ТУСУР, 2017. – 25 с.

Целью преподавания дисциплины «Когерентная оптика и голография» является формирование у бакалавров понимания теоретических и физических основ современной когерентной оптики и голографии для последующего использования этих знаний при разработке, эксплуатации, исследовании физических свойств и определении технических характеристик элементов и устройств когерентной оптики и голографии.

Предназначено для студентов очной, очно-заочной и заочной форм, обучающихся по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Когерентная и нелинейная оптика».

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____С.М. Шандаров
«__» _____ 2017 г.

КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА И ГОЛОГРАФИЯ

Методические указания к практическим занятиям
и по самостоятельной работе
для студентов направлений «Электроника и наноэлектроника» и
«Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик
ведущий электроник
каф. ЭП
_____М.В. Бородин
«__» _____ 2017 г.

Содержание

Введение.....	6
Раздел 1 Введение.....	6
1.1 Содержание раздела.....	6
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
Раздел 2 Оптический сигнал и его преобразование.....	6
2.1 Содержание раздела.....	6
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
2.3 Вопросы для самопроверки.....	7
Раздел 3 Пространственная и временная когерентность лазерного излучения.....	7
3.1 Содержание раздела.....	7
3.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
3.3 Вопросы для самопроверки.....	7
Раздел 4 Корреляционные функции и когерентность.....	8
4.1 Содержание раздела.....	8
4.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
4.3 Вопросы для самопроверки.....	8
Раздел 5 Оптика спеклов.....	9
5.1 Содержание раздела.....	9
5.2 Методические указания по изучению раздела.....	9
5.3 Вопросы для самопроверки.....	9
Раздел 6 Уравнения Максвелла в нелинейной среде.....	9
6.1 Содержание раздела.....	9
6.2 Методические указания по изучению раздела.....	10
6.3 Вопросы для самопроверки.....	10
Раздел 7 Самофокусировка световых пучков.....	10
7.1 Содержание раздела.....	10
7.2 Методические указания по изучению раздела.....	10
7.3 Вопросы для самопроверки.....	11
Раздел 8 Динамическая голография.....	11
8.1 Содержание раздела.....	11
8.2 Методические указания по изучению раздела.....	11
8.3 Вопросы для самопроверки.....	11
Раздел 9 Обращение волнового фронта и другие нелинейные явления.....	12
9.1 Содержание раздела.....	12
9.2 Методические указания по изучению раздела.....	12
9.3 Вопросы для самопроверки.....	12
10 Лабораторные работы.....	12
11 Темы для самостоятельного изучения.....	14
12 Темы практических занятий.....	14
12.1 Фурье-оптика. Обработка информации оптическими и акустооптическими методами.....	15

12.1.1	Примеры решения задач по теме «Фурье-оптика. Обработка информации оптическими и акустооптическими методами».....	15
12.1.2	Варианты задач для самоподготовки.....	16
12.2	Преобразование частоты лазерного излучения при взаимодействии волн в однородных нелинейных средах. Преобразование частоты при квазинхронном воздействии.....	17
12.2.1	Примеры решения задач по теме «Преобразование частоты лазерного излучения при взаимодействии волн в однородных нелинейных средах. Преобразование частоты при квазинхронном воздействии».....	17
12.2.2	Варианты задач для самоподготовки.....	18
12.3	Распространение световых пучков в нелинейной среде. Самофокусировка и самодефокусировка световых пучков. Пространственные оптические солитоны.....	20
12.3.1	Примеры решения задач по теме «Распространение световых пучков в нелинейной среде. Самофокусировка и самодефокусировка световых пучков. Пространственные оптические солитоны».....	20
12.3.2	Варианты задач для самоподготовки.....	21
	Заключение.....	22
	Рекомендуемая литература.....	24

Введение

Целью преподавания дисциплины «Когерентная оптика и голография» является формирование у студентов понимания теоретических и физических основ современной когерентной оптики для последующего использования этих знаний при разработке, эксплуатации, исследовании физических свойств и определении технических характеристик элементов и оптических устройств фотоники и оптоэлектроники.

Задачей дисциплины «Когерентная оптика и голография» является развитие у студентов навыков проведения научных экспериментов с применением элементов и устройств когерентной оптики и голографии.

Изучение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных студентами по дисциплинам:

1. «Математика»
2. «Материалы электронной техники»
3. «Оптические методы обработки информации»
4. «Физика»
5. «Физика конденсированного состояния»

Раздел 1 Введение

1.1 Содержание раздела

Цели и задачи, предмет и содержание курса. Современное состояние и научная проблематика когерентной оптики и голографии.

1.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Введение» следует обратить внимание на основные понятия и определения, на особенности когерентной и нелинейной оптики.

Раздел 2 Оптический сигнал и его преобразование

2.1 Содержание раздела

Преобразование Фурье. Преобразование Френеля. Преобразование Дирака. Преобразование Гильберта. Преобразование отсчетов. Интегральная операция свертки. Функция корреляции.

2.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптический сигнал и его преобразование» следует обратить внимание на особенности использования разных типов преобразования оптического сигнала.

2.3 Вопросы для самопроверки

1. Запишите математическое выражение для прямого Фурье-преобразования. В каких случаях оно применяется?
2. Запишите математическое выражение для преобразования Френеля. В каких случаях оно применяется?
3. Запишите математическое выражение для преобразования Дирака. В каких случаях оно применяется?
4. Запишите математическое выражение для преобразования Гильберта. В каких случаях оно применяется?
5. Запишите математическое выражение для функции автокорреляции. В каких случаях она применяется?
6. Где применяется преобразование отсчетов?
7. Где применяется операция свертки?

Раздел 3 Пространственная и временная когерентность лазерного излучения

3.1 Содержание раздела

Монохроматичность лазерных пучков. Функция когерентности, степень пространственной и временной когерентности. Измерение характеристик пространственной и временной когерентности, соотношение между временной когерентностью и монохроматичностью. Нестационарные пучки. Пространственная и временная когерентность одномодовых и многомодовых лазеров. Лазерная спекл-картина.

3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Пространственная и временная когерентность лазерного излучения» следует обратить внимание на подход к описанию временной и пространственной когерентности на основе комплексной степени когерентности и на физические явления, обуславливающие наличие спекл-структуры в лазерных изображениях.

3.3 Вопросы для самопроверки

1. Как можно описать математически квазимонохроматическую волну?
2. Какие факторы и явления ограничивают монохроматичность лазерного излучения?
3. Запишите математическое выражение для взаимной функции когерентности; поясните все обозначения.
4. Запишите математическое выражение для комплексной степени временной когерентности. Поясните все обозначения.

5. Запишите математическое выражение для комплексной степени пространственной когерентности. Поясните все обозначения.
6. Запишите математическое выражение для комплексной степени когерентности квазимонохроматической волны. Поясните все обозначения и ограничения, накладываемые на скорости изменения используемых параметров.
7. Каким образом можно измерить степень пространственной когерентности?
8. Каким образом можно измерить степень временной когерентности?
9. Как соотносятся друг с другом временная когерентность и монохроматичность? Каковы определения для понятий время когерентности и длина когерентности?
10. Чем определяется время когерентности для нестационарных лазерных пучков?
11. Какие лазерные пучки обладают полной пространственной когерентностью?
12. В каком режиме функционирования лазера он может в принципе обладать полной временной и пространственной когерентностью?
13. Каковы физические причины наблюдения спекл-структуры в лазерном изображении?

Раздел 4 Корреляционные функции и когерентность

4.1 Содержание раздела

Распространение взаимной когерентности. Распространение световых волн, функция взаимной когерентности. Предельные формы взаимной когерентности. Когерентное поле, некогерентное поле. Теорема Ван Циттерта-Цернике. Значение теоремы и следствия из нее. Дифракция частично когерентного излучения. Распределение интенсивности в области наблюдения.

4.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Корреляционные функции и когерентность» следует обратить внимание на подходы к описанию взаимной когерентности и распределения интенсивности в области наблюдения.

4.3 Вопросы для самопроверки

1. Каким выражением описывается закон распространения взаимной интенсивности?
2. Когда волновое поле можно назвать полностью когерентным?
3. Применяется ли принцип Гюйгенса — Френеля в случае некогерентного волнового поля?

4. Что описывает теорема Ван Циттерта — Цернике? Как она формулируется?
5. Что называется интервалом пространственной когерентности?
6. Чем определяется распределение интенсивности в дифракционной картине?
7. Как форма дифракционной картины распределения интенсивности зависит от площади когерентности?

Раздел 5 Оптика спеклов

5.1 Содержание раздела

Понятие «спекл». Спекл-картина объективная и субъективная, основные свойства и условия формирования. Нормально развитая спекл-структура, условия ее наблюдения, контраст, индивидуальный спекл. Интерференция в диффузном свете. Опыт Берча-Токарского. Спекл-интерферометрия. Способы устранения спекл-структуры.

5.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптика спеклов» следует обратить внимание на подходы к описанию спекл-картин и принципы их формирования.

5.3 Вопросы для самопроверки

1. Что такое спеклы?
2. Объективная и субъективная спекл-картины — что это такое и как их можно получить?
3. Как меняется субъективная спекл-картина, полученная при засвечивании диффузного объекта лазером, при смещении, повороте?
4. В чём отличие спеклов Френеля от спеклов Фраунгофера?
5. Каковы условия получения нормально развитой спекл-картины?
6. Каков контраст такой картины для поляризованного излучения?
7. Что называют индивидуальным спеклом?
8. Опишите методику вычитания изображений.
9. Как применяется спекл-интерферометрия?
10. Какие методы устранения спеклов вам известны? Какими способами они реализуются?

Раздел 6 Уравнения Максвелла в нелинейной среде

6.1 Содержание раздела

Макроскопическая нелинейная оптика Поляризация и восприимчивость вещества. Плотность потока электромагнитной энергии. Энергия поля в среде.

6.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Общие вопросы нелинейной оптики» следует обратить внимание на подходы к описанию нелинейной поляризации и восприимчивости вещества и нелинейных эффектов второго и третьего порядка.

6.3 Вопросы для самопроверки

1. Запишите разложение электрической поляризации среды по степеням напряженности электрического поля. Поясните все обозначения.
2. Как найти нелинейную электрическую поляризацию среды при воздействии на неё двух монохроматических полей с различными частотами? На каких частотах она будет проявляться при учете нелинейных явлений второго порядка?
3. Запишите матрицу коэффициентов нелинейной оптической восприимчивости второго порядка для кристаллов симметрии $3m$.
4. Запишите волновое уравнение для среды с учетом наводимой в ней световыми волнами нелинейной электрической поляризации. Поясните все обозначения.
5. Запишите математическое выражение для нелинейной электрической поляризации в среде с квадратичной нелинейностью, при взаимодействии в ней двух плоских монохроматических волн с одинаковыми частотами. Поясните все обозначения.
6. Где используются нелинейные эффекты второго порядка?

Раздел 7 Самофокусировка световых пучков

7.1 Содержание раздела

Уравнение для слабоизменяющихся пучков в слабонеоднородных средах. Неустойчивость неограниченной плоской волны. Самофокусировка и дефокусировка гауссовых пучков. Тепловая самофокусировка. Дефокусировка световых пучков. Фазовая самомодуляция и компрессия световых импульсов.

7.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Самофокусировка световых пучков» следует обратить внимание на физические механизмы, приводящие к явлениям самовоздействия световых пучков и световых импульсов и на подходы к математическому описанию эффектов самовоздействия.

7.3 Вопросы для самопроверки

1. Опишите подход, позволяющий вывести $(2+1)$ -мерное нелинейное уравнение Шрёдингера.
2. Запишите $(1+1)$ -мерное нелинейное уравнение Шрёдингера, описывающее светлые пространственные солитоны.
3. Опишите подход, позволяющий получить решение $(1+1)$ -мерного нелинейного уравнения Шрёдингера в виде светлого пространственного солитона.
4. Как связана требуемая пиковая интенсивность светлого $(1+1)$ -мерного пространственного солитона с его шириной? Дайте физическую трактовку наблюдаемой связи.
5. Запишите $(1+1)$ -мерное нелинейное уравнение Шрёдингера, описывающее распространение световых импульсов в волоконных световодах. Поясните физический смысл каждого члена, входящего в данное уравнение.
6. Запишите $(3+1)$ -мерное обобщенное нелинейное уравнение Шрёдингера. Какие явления могут быть с помощью него описаны?
7. Поясните физическую суть эффектов фазовой самомодуляции и компрессии световых импульсов.

Раздел 8 Динамическая голография

8.1 Содержание раздела

Основные понятия. Простейшая схема динамической голографии. Динамическая голография нестационарных волн. Процессы, лежащие в основе динамической голографии. Регистрирующие среды. Практическое применение.

8.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Динамическая голография» следует обратить внимание на физическую суть явлений, лежащих в основе динамической голографии.

8.3 Вопросы для самопроверки

1. Каковы особенности динамической голографии по сравнению с обычной (статической)?
2. В каком случае двухволновое взаимодействие приводит к изменению фаз волн без изменения интенсивностей?

3. Нарисуйте схему взаимодействия на динамической голограмме, используемую для усиления интенсивности светового пучка.
4. Какие физические процессы лежат в основе динамической голографии?
5. Какие материалы используются в качестве регистрирующих сред в динамической голографии?
6. Где применяется динамическая голография?

Раздел 9 Обращение волнового фронта и другие нелинейные явления

9.1 Содержание раздела

Обращение волнового фронта. Способы обращения волнового фронта и применения. Оптическая бистабильность. Нелинейный интерферометр Фабри-Перо. Нелинейные явления в волокне. Нелинейные явления в плазме.

9.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Обращение волнового фронта и другие нелинейные явления» следует обратить внимание на физическую суть явлений, обеспечивающих обращение волнового фронта световых пучков, а также реализацию оптической бистабильности.

9.3 Вопросы для самопроверки

1. Чем явление обращения волнового фронта светового пучка отличается от его обычного отражения?
2. Нарисуйте схему взаимодействия пучков на динамической голограмме, используемой для обращения волнового фронта световых пучков.
3. Нарисуйте схему, позволяющую реализовать самообращение волнового фронта световых пучков, на основе использования динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах.
4. Почему для обращения волнового фронта световых пучков на основе четырехволнового взаимодействия не требуется использование специальных мер по выполнению условий фазового синхронизма?
5. Какие условия необходимы для реализации бистабильности в оптической системе?
6. Какие физические явления приводят к оптической бистабильности в нелинейном интерферометре Фабри-Перо?
7. Что такое гибридная бистабильность в оптической системе?

10 Лабораторные работы

В процессе выполнения лабораторных занятий студент не только закрепляет теоретические знания, но и пополняет их. Вся работа при

выполнении лабораторной работы разбивается на следующие этапы: вступительный, проведение эксперимента и (или) численных расчетов и обработка результатов.

В процессе домашней подготовки студент проверяет качество усвоения проработанного материала по вопросам для самоконтроля, относящимся к изучаемой теме. Без проведения такой предварительной подготовки к лабораторной работе студент не допускается к выполнению эксперимента.

Помимо домашней работы, студенты готовятся к выполнению эксперимента также на рабочем месте: они знакомятся с установкой, уточняют порядок выполнения работы, распределяют рабочие функции между членами бригады. В ходе аудиторной подготовки преподаватель путем собеседования выявляет и оценивает степень готовности каждого студента к проведению эксперимента и (или) численных расчетов, как и знание им теоретического материала. Студенты, не подготовленные к выполнению работы или не представившие отчеты по предыдущей работе, к выполнению новой работы могут быть не допущены и все отведенное время для лабораторной работы должны находиться в лаборатории, изучать по рекомендованной литературе тот материал, с которым они не познакомились дома. К выполнению работы они могут быть допущены только после собеседования и в часы сверх расписания, по договоренности с преподавателем. Все пропущенные лабораторные работы по уважительным или неуважительным причинам могут быть выполнены в конце семестра на дополнительных занятиях.

Второй этап работы – проведение эксперимента и (или) численных расчетов в лаборатории. На этом этапе очень важно, чтобы студент выполнил самостоятельно и грамотно необходимые измерения и наблюдения, а также, если это определено заданием, численные расчеты, укладываясь в отведенное для этого время. При организации своей работы для проведения эксперимента и (или) численных расчетов целесообразно исходить из рекомендаций, изложенных в руководствах для выполняемой лабораторной работы.

На последнем этапе работы студент производит обработку данных измерений и расчетов и анализ полученных результатов.

Отчет студента по работе должен быть индивидуальным. Анализ результатов является важной частью отчета.

Ниже приведены названия лабораторных работ.

1. Пространственная фильтрация оптических изображений.
2. Фазовый синхронизм при генерации второй гармоники лазерного излучения в одноосных кристаллах. Исследование углового синхронизма.
3. Амплитудная электрооптическая модуляция лазерного излучения.

11 Темы для самостоятельного изучения

Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют студенту самостоятельно решать задачи. Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение ниже предложенных тем.

1. Параметры современных когерентных источников (мощность, длительность, спектральная ширина, расходимость) и фундаментальные проблемы физики, решаемые с их использованием.
2. Методы разрушения когерентности .
3. Спеклы.
4. Современные лазерные установки.
5. Когерентное состояние вещества.
6. Конденсат Бозе-Эйнштейна.
7. Лазерное охлаждение вещества.
8. Фоточувствительные среды.
9. Компьютерная голография.
10. Применение голографии.
11. Современные голографические установки.
12. Способы защиты голограмм от подделок.
13. Современные технологии записи художественных голограмм.
14. Спеклограммы.
15. Компакт-диски. Принципы записи и чтения.

12 Темы практических занятий

На практических занятиях студенты рассматривают варианты задач. Целью занятий является углубление понимания процессов, происходящих в системах и устройствах когерентной и голографической оптики. Уделяется внимание таким вопросам, как Фурье-оптика, нелинейная поляризация среды, преобразование частоты лазерного излучения, распространение световых пучков в нелинейной среде, оптические пространственные солитоны.

Перед практическими занятиями студент должен повторить лекционный материал, ответив на вопросы для самоконтроля по необходимой теме, а также просмотреть рекомендации по решению типичных задач этой темы. Темы практических занятий приведены ниже:

1. Фурье-оптика. Обработка информации оптическими и акустооптическими методами.
2. Преобразование частоты лазерного излучения при взаимодействии волн в однородных нелинейных средах. Преобразование частоты при квазисинхронном взаимодействии.

3. Распространение световых пучков в нелинейной среде. Самофокусировка и самодефокусировка световых пучков. Пространственные оптические солитоны.

12.1 Фурье-оптика. Обработка информации оптическими и акустооптическими методами

12.1.1 Примеры решения задач по теме «Фурье-оптика. Обработка информации оптическими и акустооптическими методами»

Задача 1. Найдите в аналитическом виде распределение поля в когерентной оптической системе в спектральной плоскости, если в сигнальной плоскости помещен транспарант, представляющий тонкий непрозрачный экран с отверстием прямоугольной формы, центр которого расположен при $x_1 = 0$ и $y_1 = 0$. Размеры отверстия составляют $a = 2$ мм по оси x_1 и $b = 0,2$ мм по оси y_1 . Проведите анализ распределения амплитуды света в спектральной плоскости для $\lambda = 650$ нм и $F = 40$ см.

Решение. Функцию пропускания транспаранта представим в следующем виде:

$$T(x_1, y_1) = \begin{cases} 1, & \text{при } -a/2 \leq x_1 \leq a/2, \quad -b/2 \leq y_1 \leq b/2 \\ 0, & \text{при } -a/2 > x_1 > a/2, \quad -b/2 > y_1 > b/2 \end{cases}$$

Учитывая, что в когерентной оптической системе (КОС) используется плоская волна с постоянной амплитудой E_0 , распределение поля в её сигнальной плоскости представим, как

$$E_1(x_1, y_1) = E_0 T(x_1, y_1).$$

Тогда поле в спектральной плоскости КОС определяется интегралом

$$E_2(x_2, y_2) = E_0 \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} \exp[i(\omega_{x_2} x_1 + \omega_{y_2} y_1)] dx_1 dy_1$$

с пространственными частотами

$$\omega_{x_2} = \frac{2\pi}{\lambda F} x_2, \quad \omega_{y_2} = \frac{2\pi}{\lambda F} y_2.$$

Выполняя интегрирование, получаем:

$$E_2(x_2, y_2) = abE_0 \frac{\sin(\pi a x_2 / \lambda F)}{(\pi a x_2 / \lambda F)} \cdot \frac{\sin(\pi b y_2 / \lambda F)}{(\pi b y_2 / \lambda F)}.$$

Ответ: Распределение амплитуды света в спектральной плоскости КОС с координатными осями x_2 , y_2 определяется выражением

$$E_2(x_2, y_2) = abE_0 \frac{\sin(\pi a x_2 / \lambda F)}{(\pi a x_2 / \lambda F)} \cdot \frac{\sin(\pi b y_2 / \lambda F)}{(\pi b y_2 / \lambda F)}.$$

Задача 2. Падающий под углом Брэгга световой пучок с длиной волны $\lambda = 532$ нм дифрагирует на фазовой решетке с пространственным периодом $\Lambda = 2$ мкм, сформированной в кубическом кристалле с показателем преломления $n = 2,6$. Определите угол, на который в кристалле дифрагированный пучок отклоняется от падающего.

Решение. Угол Брэгга θ_B в среде с показателем преломления n связан с пространственным периодом решетки Λ и длиной волны света в вакууме λ соотношением:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\Lambda}.$$

Учитывая, что угол дифракции θ равен удвоенному углу Брэгга, в результате получаем:

$$\theta = 2\theta_B = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{2n\Lambda}\right).$$

Подставляя сюда значения, заданные в условиях задачи, находим, что $\theta = 0.102$ рад = 5.86° .

Ответ: Угол, на который в кристалле дифрагированный пучок отклоняется от падающего, равен 0.102 рад = 5.86° .

12.1.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Найдите в аналитическом виде распределение поля в когерентной оптической системе в спектральной плоскости, если в сигнальной плоскости помещен транспарант, представляющий тонкий непрозрачный экран с отверстием прямоугольной формы, центр которого расположен при $x_1 = a_0$ и $y_1 = 0$, где $a_0 = 1$ мм. Размеры отверстия составляют $a = 0,2$ мм по оси x_1 и $b = 2$ мм по оси y_1 . Проведите анализ распределения амплитуды и интенсивности света в спектральной плоскости для $\lambda = 532$ нм и $F = 20$ см.

2. Найдите в аналитическом виде распределение поля в когерентной оптической системе в спектральной плоскости, если в сигнальной плоскости помещен транспарант, представляющий тонкий непрозрачный экран с отверстием прямоугольной формы, центр которого расположен при $x_1 = 0$ и $y_1 = b_0$, где $b_0 = 2$ мм. Размеры отверстия составляют $a = 3$ мм по оси x_1 и $b = 0,5$ мм по оси y_1 . Проведите анализ распределения амплитуды и интенсивности света в спектральной плоскости для $\lambda = 633$ нм и $F = 10$ см.

3. Найдите в аналитическом виде распределение поля в когерентной оптической системе в спектральной плоскости, если в сигнальной плоскости при $x_1 = \pm x_0$ находятся два точечных источника света. Проведите анализ распределения амплитуды и интенсивности света в спектральной плоскости для $x_0 = 100$ мкм, $\lambda = 650$ нм и $F = 10$ см.

4. Падающий под углом Брэгга световой пучок с длиной волны 1.06 мкм дифрагирует на акустической волне с частотой 0.5 ГГц, распространяющейся со скоростью $4,8 \cdot 10^3$ м/с в светозвукопроводе, изготовленном из изотропного материала с показателем преломления $n = 2,2$. Определите угол, на который отклоняется дифрагированный пучок от падающего, в светозвукопроводе и вне его.

5. В акустооптическом спектральном фильтре используется коллинеарная дифракция света на сдвиговой акустической волне, распространяющейся вдоль оси Y одноосного кристалла со скоростью $4 \cdot 10^3$ м/с. Определите диапазон частот акустической волны, при котором

максимум пропускания фильтра можно перестраивать от 400 до 750 нм, если обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла равны 2,2868 и 2,202, соответственно.

6. В акустооптическом модуляторе на основе оптически отрицательного одноосного кристалла с обыкновенным и необыкновенным показателями преломления, равными соответственно 2,2868 и 2,202 на используемой длине волны 633 нм, аномальная дифракция света с широкополосной геометрией происходит на сдвиговой акустической волне, распространяющейся вдоль оптической оси Z со скоростью $3,58 \cdot 10^3$ м/с. Найдите центральную частоту для данного типа дифракции; нарисуйте диаграмму волновых векторов взаимодействующих волн, соответствующую этой частоте.

7. Объемная пропускающая фазовая голограмма в кристалле ниобата лития характеризуется пространственным периодом 10 мкм и амплитудой модуляции показателя преломления $\Delta n_m = 1 \times 10^{-5}$ для излучения с длиной волны 633 нм, при невозмущенном показателе преломления $n^{(0)} = 2,202$.

Для кристалла с толщиной 1 мм найдите:

1. Максимальную дифракционную эффективность голограммы.
2. Угол падения считывающего пучка из воздушной среды на входную грань, при котором дифракционная эффективность голограммы максимальна.
3. Угол отклонения дифрагированного пучка от считывающего на выходе, в воздушной среде.

8. Объемная пропускающая фазовая голограмма в кристалле ниобата лития записывается световыми пучками с длиной волны 532 нм (показатель преломления $n^{(0)} = 2,233$), при угле между пучками 10° , симметрично падающими на входную грань. Найдите пространственный период голограммы и угол падения считывающего пучка с длиной волны 655 нм (показатель преломления $n^{(0)} = 2,195$) на входную грань, при котором дифрагированный пучок на этой длине волны будет иметь максимальную интенсивность.

12.2 Преобразование частоты лазерного излучения при взаимодействии волн в однородных нелинейных средах. Преобразование частоты при квазисинхронном взаимодействии

12.2.1 Примеры решения задач по теме «Преобразование частоты лазерного излучения при взаимодействии волн в однородных нелинейных средах. Преобразование частоты при квазисинхронном взаимодействии»

Задача 1. Выведите уравнение для эволюции амплитуды светового поля волны второй гармоники, имеющей необыкновенную поляризацию, при её генерации обыкновенно поляризованной волной накачки с частотой ω , распространяющейся вдоль оси x в кристалле ниобата лития, с использованием метода медленно меняющихся амплитуд.

Решение. Запишем выражения для полей взаимодействующих волн:

$$E_y^\omega(x,t) = \frac{1}{2} \dot{E}_{my}^\omega(x) \exp\left[i(\omega t - k_0 n_o^\omega x)\right] + \text{к.с.},$$

$$E_z^{2\omega}(x,t) = \frac{1}{2} \dot{E}_{mz}^{2\omega}(x) \exp\left[i(2\omega t - 2k_0 n_e^{2\omega} x)\right] + \text{к.с.},$$

где $k_0 = \omega/c$. Далее находим компоненту наведенной электрической поляризации $P_z^{2\omega}$, которая дает вклад в генерацию второй гармоники в рассматриваемом случае, как

$$P_z^{2\omega}(x,t) = \varepsilon_0 d_{31} \left\{ \frac{1}{2} \left[\dot{E}_{my}^\omega(x,t) \right]^2 \exp\left[i(2\omega t - 2k_0 n_o^\omega x)\right] + \text{к.с.} \right\}$$

Подставляя далее $E_z^{2\omega}(x,t)$ и $P_z^{2\omega}(x,t)$ в волновое уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \frac{\partial^2 (\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E})}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{nl}}{\partial t^2}$$

получаем

$$\left\{ \frac{d^2 \dot{E}_{mz}^{2\omega}}{dx^2} - 4ik_0 n_e^\omega \frac{d\dot{E}_{mz}^{2\omega}}{dx} - \left[4k_0^2 (n_e^{2\omega})^2 - \mu_0 \varepsilon_0 (n_e^{2\omega})^2 (2\omega)^2 \right] \dot{E}_{mz}^{2\omega} \right\} \times \\ \times \exp\left[i(2\omega t - 2k_0 n_e^{2\omega} x)\right] = -\mu_0 (2\omega)^2 \varepsilon_0 d_{31} (\dot{E}_{my}^\omega)^2 \exp\left[i(2\omega t - 2k_0 n_o^\omega x)\right]$$

Используя далее приближение медленно меняющихся амплитуд

$$\frac{d^2 \dot{E}_{mz}^{2\omega}}{dx^2} \ll 4k_0 n_e^\omega \frac{d\dot{E}_{mz}^{2\omega}}{dx}$$

окончательно получаем:

$$\frac{d\dot{E}_m^{2\omega}}{dx} = -i \frac{\omega}{c n_e^{2\omega}} (\dot{E}_{my}^\omega)^2 d_{31} \exp\left[i2k_0 (n_e^{2\omega} - n_o^\omega) x\right]$$

Ответ:

$$\frac{d\dot{E}_m^{2\omega}}{dx} = -i \frac{\omega}{c n_e^{2\omega}} (\dot{E}_{my}^\omega)^2 d_{31} \exp\left[i2k_0 (n_e^{2\omega} - n_o^\omega) x\right]$$

12.2.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Для волны накачки с частотой ω , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся под углом θ к оси z в плоскости YZ кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте 2ω .

2. Для волны накачки с частотой ω , имеющей необыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси x кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте 2ω .

3. Для волны накачки с частотой ω , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси y кристалла нитрида галлия (класс симметрии $6mm$), найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте 2ω .

4. Для волн с частотами ω_1 и ω_2 , имеющих необыкновенную поляризацию и распространяющихся вдоль оси x кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на суммарной частоте.

5. Выведите уравнение для эволюции амплитуды светового поля волны второй гармоники, имеющей необыкновенную поляризацию, при её генерации необыкновенно поляризованной волной накачки с частотой ω , распространяющейся вдоль оси y в кристалле ниобата лития, с использованием метода медленно меняющихся амплитуд.

6. Выведите уравнение для эволюции амплитуды светового поля волны второй гармоники, имеющей необыкновенную поляризацию, при её генерации обыкновенно поляризованной волной накачки с частотой ω , распространяющейся вдоль оси x в кристалле нитрида галлия (класс симметрии $6mm$), с использованием метода медленно меняющихся амплитуд.

7. Выведите уравнение для эволюции амплитуды светового поля волны второй гармоники, имеющей необыкновенную поляризацию, при её генерации обыкновенно поляризованной волной накачки с частотой ω , распространяющейся под углом 45° к оси x кристалла дигидрофосфата калия (класс симметрии 4_2m), с использованием метода медленно меняющихся амплитуд.

8. Для генерации второй гармоники в ниобате лития конгруэнтного состава излучением накачки с обыкновенной поляризацией и длиной волны 1064 нм найдите ориентацию кристалла относительно его кристаллографических осей, при которой для распространяющихся вдоль нормали к входной грани световых волн условия синхронизма будут выполняться точно.

Показатели преломления ниобата лития: $n_o = 2.24614$ и $n_e = 2.16256$ на длине волны 1064 нм; $n_o = 2.32802$ и $n_e = 2.23148$ на длине волны 532 нм.

9. Для генерации второй гармоники волной накачки, имеющей необыкновенную поляризацию и длину волны 1064 нм, в кристалле ниобата лития с показателями преломления, приведенными в Задаче 4, и со значениями компонент тензора нелинейной оптической восприимчивости $d_{22} = 3,07$ пм/В; $d_{31} = d_{15} = 5,82$ пм/В; $d_{33} = 40,68$ пм/В найдите:

1. Направления распространения взаимодействующих волн, при которых нелинейная поляризация будет максимальной.

2. Нелинейную поляризацию на частоте второй гармоники для этого случая.

3. Длину когерентности для этого же случая.

4. Уравнение, описывающее эволюцию комплексной амплитуды световой волны на частоте второй гармоники для этого случая.

5. Решение этого уравнения для кристалла, содержащего 2 пластины найденной ориентации с одинаковой толщиной, равной длине когерентности, но с противоположно ориентированными оптическими осями S .

10. Для конгруэнтного ниобата лития, имеющего значения необыкновенного показателя преломления $n_e = 2,16256$ на длине волны накачки $\lambda_1 = 1064$ нм и $n_e = 2,23148$ на длине волны второй гармоники $\lambda_2 = 532$ нм, определите пространственный период доменной структуры, обеспечивающей генерацию второй гармоники в режиме фазового квазисинхронизма первого и второго порядков.

11. В параметрическом генераторе света используется квазисинхронное взаимодействие на периодической доменной структуре необыкновенно поляризованных волн, распространяющихся вдоль оси x в кристалле ниобата лития, выращенном из расплава стехиометрического состава. Значения необыкновенного показателя преломления кристалла определяются уравнением Селлмейера

$$n_e^2 = 4,5567 + 2,605 \cdot 10^{-7} T^2 + \frac{0,097 + 2,7 \cdot 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0,201 + 5,4 \cdot 10^{-8} T^2)^2} - 2,24 \cdot 10^{-2} \lambda^2,$$

где длина волны задается в микрометрах, и T – в градусах Кельвина.

Найдите:

1. Длину волны излучения для холостой волны при длинах волн накачки 532 нм и сигнала 1300 нм.
2. Пространственный период периодической доменной структуры, обеспечивающей квазисинхронную параметрическую генерацию сигнала с длиной волны 1300 нм при накачке на длине волны 532 нм, для температуры кристалла 20 °С.

12.3 Распространение световых пучков в нелинейной среде. Самофокусировка и самодефокусировка световых пучков. Пространственные оптические солитоны

12.3.1 Примеры решения задач по теме «Распространение световых пучков в нелинейной среде. Самофокусировка и самодефокусировка световых пучков. Пространственные оптические солитоны»

Задача 1. Из скалярного волнового уравнения

$$\nabla^2 E - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

для нелинейной немагнитной среды получите волновое уравнение в параксиальном приближении, которому должна удовлетворять амплитуда $A(y, z)$ распространяющегося вдоль оси z монохроматического одномерного светового пучка

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{i}{2nk_0} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = ik_0 \Delta n_{nl} A$$

где n – показатель преломления среды в линейном режиме, Δn_{nl} – нелинейная добавка к показателю преломления и $k_0 = \omega/c$.

Решение. Представим решение для электрического поля светового пучка в виде

$$E(y, z, t) = A(y, z) \exp(ink_0 z - i\omega t),$$

и выразим параметры среды, как $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = \varepsilon_0(n + \Delta n_{nl})^2 \approx \varepsilon_0(n^2 + 2n \Delta n_{nl})$, поскольку $\Delta n_{nl} \ll n$. Подставляя полученные результаты в скалярное волновое уравнение и учитывая выполнение в параксиальном приближении условия медленного изменения амплитуды пучка $\partial^2 A / \partial z^2 \ll k_0 n (\partial A / \partial z)$, получаем необходимое уравнение.

Ответ: Амплитуда $A(y, z)$ распространяющегося вдоль оси z монохроматического одномерного светового пучка будет удовлетворять волновому уравнению в параксиальном приближении при представлении светового поля в виде $E(y, z, t) = A(y, z) \exp(ink_0 z - i\omega t)$, при выполнении неравенств $\Delta n_{nl} \ll n$ и $\partial^2 A / \partial z^2 \ll k_0 n (\partial A / \partial z)$.

12.3.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Из скалярного волнового уравнения

$$\nabla^2 E - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

для нелинейной немагнитной среды получите волновое уравнение в параксиальном приближении, которому должна удовлетворять амплитуда $A(x, y, z)$ распространяющегося вдоль оси z монохроматического светового пучка

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = \frac{ik \Delta n_{nl}}{n} A,$$

где n – показатель преломления среды в линейном режиме, Δn_{nl} – нелинейная добавка к показателю преломления и k – волновое число для плоской волны, распространяющейся в рассматриваемой среде вдоль оси z .

2. Из волнового уравнения в параксиальном приближении,

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = \frac{ik \Delta n_{nl}}{n} A,$$

используя решение для амплитуды светового пучка в виде функции с разделяющимися переменными, получите нелинейное уравнение Шрёдингера:

$$U'' + \left(\frac{2k^2 \Delta n_{nl}}{n} - 2k\gamma \right) U = 0,$$

где $U'' = \partial^2 U / \partial x^2$.

3. Для среды с кубичной нелинейностью Керра, в которой $\Delta n_{nl}^{(x)} = n_{(2)} I(x, z)$, где $n_{(2)}$ – нелинейный показатель преломления, из полученного в Задаче 2 нелинейного уравнения Шрёдингера выведите уравнение

$$U - \frac{1}{2k\gamma} U'' = \frac{\alpha}{\gamma} U^3,$$

решение которого приводит к светлым и темным пространственным солитонам.

4. Покажите, что при $\alpha > 0$ полученное в Задаче 3 нелинейное уравнение имеет решение в виде светлого пространственного солитона, $U(\xi) = (2\gamma/\alpha)^{1/2} \text{sch}(\xi)$, где $\xi = \sqrt{2k\gamma}x$ – нормированная поперечная координата.

5. Покажите, что при $\alpha < 0$ полученное в Задаче 3 нелинейное уравнение имеет решение в виде темного пространственного солитона, $U(\xi) = (\gamma/\alpha)^{1/2} \text{th}(\xi/\sqrt{2})$, где $\xi = \sqrt{-2k\gamma}x$ – нормированная поперечная координата.

6. Покажите, что в случае фотовольтаического механизма оптической нелинейности, при

$$\Delta n_{ni}^{(phv)} = AI_d^{-1} \frac{I(x, z)/I_d}{1 + I(x, z)/I_d},$$

где I_d – темновая интенсивность, полученное в Задаче 2 нелинейное уравнение Шрёдингера приводится к уравнению

$$U - \frac{1}{2k\gamma} U'' = \frac{\beta}{\gamma} \frac{U^3}{(1 + U^2)},$$

описывающему фотовольтаические солитоны.

7. Покажите, что в случае дрейфового механизма фоторефрактивной нелинейности, при

$$\Delta n_{ni}^{(drift)} = B \frac{I_{bg}}{I_{bg} + I(x, z)} E_{ext},$$

где I_{bg} – интенсивность фоновой подсветки среды и E_{ext} – напряженность внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу, полученное в Задаче 2 нелинейное уравнение Шрёдингера приводится к уравнению

$$U - \frac{1}{2k\gamma} U'' = \frac{F}{\gamma} \frac{U}{(1 + U^2)},$$

описывающему, в зависимости от полярности прикладываемого напряжения, светлые и темные фоторефрактивные пространственные солитоны.

Заключение

В результате изучения дисциплины студент должен знать ответы, как минимум, на следующие вопросы.

1. Запишите математическое выражение для прямого Фурье-преобразования. В каких случаях оно применяется?

2. Запишите математическое выражение для преобразования Фурье. В каких случаях оно применяется?

3. Как можно описать математически квазимонохроматическую волну?

4. Запишите математическое выражение для взаимной функции когерентности; поясните все обозначения.

5. Запишите математическое выражение для комплексной степени когерентности квазимонохроматической волны. Поясните все обозначения и ограничения, накладываемые на скорости изменения используемых параметров.

6. Как соотносятся друг с другом временная когерентность и монохроматичность? Каковы определения для понятий «время когерентности» и «длина когерентности»?

7. В каком режиме функционирования лазера он может в принципе обладать полной временной и пространственной когерентностью?

8. Когда волновое поле можно назвать полностью когерентным?

9. Что описывает теорема Ван Циттерта — Цернике? Как она формулируется?

10. Что называется интервалом пространственной когерентности?

11. Чем определяется распределение интенсивности в дифракционной картине?

12. Что такое спеклы?

13. Как меняется субъективная спекл-картина, полученная при засвечивании диффузного объекта лазером, при смещении, повороте?

14. В чём отличие спеклов Френеля от спеклов Фраунгофера?

15. Каковы условия получения нормально развитой спекл-картины?

16. Какие методы устранения спеклов вам известны? Какими способами они реализуются?

17. Как найти нелинейную электрическую поляризацию среды при воздействии на неё двух монохроматических полей с различными частотами? На каких частотах она будет проявляться при учете нелинейных явлений второго порядка?

18. Запишите математическое выражение для нелинейной электрической поляризации в среде с квадратичной нелинейностью, при взаимодействии в ней двух плоских монохроматических волн с одинаковыми частотами. Поясните все обозначения.

19. Запишите волновое уравнение для среды с учетом наводимой в ней световыми волнами нелинейной электрической поляризации. Поясните все обозначения.

20. Запишите $(1+1)$ -мерное нелинейное уравнение Шрёдингера, описывающее светлые пространственные солитоны.

21. Опишите подход, позволяющий получить решение $(1+1)$ -мерного нелинейного уравнения Шрёдингера в виде светлого пространственного солитона.

22. Как связана требуемая пиковая интенсивность светлого $(1+1)$ -мерного пространственного солитона с его шириной? Дайте физическую трактовку наблюдаемой связи.

23. В каком случае двухволновое взаимодействие на динамической голограмме приводит к изменению фаз волн без изменения интенсивностей?

24. Какие физические процессы лежат в основе динамической голографии?

25. Какие материалы используются в качестве регистрирующих сред в динамической голографии?

26. Чем явление обращения волнового фронта светового пучка отличается от его обычного отражения?

27. Нарисуйте схему взаимодействия пучков на динамической голограмме, используемой для обращения волнового фронта световых пучков.

28. Какие условия необходимы для реализации бистабильности в оптической системе?

Рекомендуемая литература

1. Киселев Г. Л. Квантовая и оптическая электроника : Учебное пособие. 2 е изд., испр. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 320 с.: ил. ISBN 978 5 8114 1114 6, http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=627

2. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах : монография / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 242 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/1553>

3. Шандаров С.М. Введение в нелинейную оптику : учебное пособие для студентов направлений подготовки «Фотоника и оптоинформатика», «Электроника и наноэлектроника», «Электроника и микроэлектроника» / С.М. Шандаров. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 41 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/2059>

4. Шандаров В.М. Основы физической и квантовой оптики: учеб. пособие / В.М. Шандаров; Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 197 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/750>

5. Дубнищев Ю.Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах : Учебное пособие. 4-е изд., испр. и доп. — СПб. : Издательство «Лань», 2011. — 368 с., ISBN 978-5-8114-1156-6, http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=698.

6. Пуговкин А.В., Серебренников Л.Я., Шандаров С.М. Введение в оптическую обработку информации. – Томск: Изд-во ТГУ, 1981.

7. Шепелевич В.В. Введение в когерентную оптику и голографию. – Минск: Выш. шк., 1985.

8. Информационная оптика / Под ред. Н.Н. Евтихеева. Учебное пособие – М., Издательство МЭИ, 2000. - 516 с. (экз. - 19)

9. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с. (экз. - 150)

10. Бельдюгин И.М., Золотарев М.В., Свиридов К.А. Теория и применение оптических приборов на основе четырехволнового взаимодействия в фоторефрактивных кристаллах // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. - № 3. - С. 52-81; № 4. - С. 72-89.

11. Прикладная нелинейная оптика: учебное пособие / П. П. Гейко. – Томск: ТУСУР, 2007. – 109 с. (экз. - 83)

12. Справочник по лазерам : в 2 т.: пер. с англ. с изм. и доп. / ред. пер. А. М. Прохоров. - М. : Советское радио, 1978. - Т. 2 / М. Ф. Стельмах, Г. Когельник [и др.]. - М. : Советское радио, 1978. - 400 с. (экз. - 9)

13. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. Индуцированные домены и периодические доменные структуры в электро- и магнитоупорядоченных веществах // УФН. – 2000. – Т. 170, № 7. – С. 697-712.

14. Коханчик Л.С., Бородин М.В., Шандаров С.М., Буримов Н.И., Волк Т.Р., Щербина В.В. Периодические доменные структуры, сформированные электронным лучом в пластинах LiNbO₃ и планарных волноводах Ti:LiNbO₃ Y-ориентации // ФТТ. – 2010. – Т. 52, вып. 8. – С. 1602-1609.

15. Гудмен Дж. Статистическая оптика: учебная монография: пер. с англ. / Дж. Гудмен ; пер. : А. А. Кокин ; ред. пер. : Г. В. Скряцкий. – М.: Мир, 1988. – 527 с. (экз. - 9)

16. Розеншер Э. Оптоэлектроника : Пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; ред. пер. О. Н. Ермаков. - М. : Техносфера, 2006. - 588 с. (экз. - 40)

17. Фролова М.Н., Бородин М.В., Шандаров С.М., Шандаров В.М., Ларионов Ю.М. Темные пространственные оптические солитоны в планарных волноводах на Z-срезе кристаллов симметрии 3m // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33, №11. – С. 1001-1006.

18. Шандаров С.М., Буримов Н.И. Амплитудная электрооптическая модуляция лазерного излучения: Методические указания к лабораторной работе по курсам "Нелинейная оптика" и "Когерентная оптика и голография" для студентов направлений 200700 "Фотоника и оптоинформатика" и 210100 "Электроника и наноэлектроника" / Шандаров С. М., Буримов Н. И. – 2014. 19 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/4103>

19. Шандаров С.М., Бородин М.В. Фазовый синхронизм при генерации второй гармоники лазерного излучения в одноосных кристаллах: Методические указания к лабораторной работе / С.М. Шандаров, М.В. Бородин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 21 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/1893>

20. Шандаров С. М., Шмаков С. С. Пространственная фильтрация оптических изображений: Методические указания к лабораторной работе / Шандаров С. М., Шмаков С. С. – Томск: ТУСУР, 2014. 15 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/4125>