

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

Кафедра электронных приборов

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Методические указания к практическим занятиям и по
самостоятельной работе
для студентов направления 200700 «Фотоника и
оптоинформатика»

2014

Шандаров, Станислав Михайлович

Оптические методы обработки информации : Методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для студентов направления 200700.62 – «Фотоника и оптоинформатика» / С.М. Шандаров. 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, 2014. – 28 с.

Целью преподавания дисциплины «Оптические методы обработки информации» является ознакомление бакалавров с общими физическими принципами фурье-оптики, фоторефрактивного эффекта и динамической голографии и освоение студентами методов, используемых при разработке, расчете, эксплуатации и исследованиях оптических и голографических устройств и систем обработки, хранения и передачи информации.

В ходе выполнения работы у студентов направления 200700 формируются:

- способность владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере (ПК-12);

- способность применить навыки компьютерного моделирования информационных сигналов и систем, синтеза кодов, количественного анализа характеристик информационных систем, приемы практического решения задач выбора и оценки эффективности различных архитектурных и структурных решений с точки зрения производительности, надежности и стоимости вычислительных систем, приемы организации различных видов памяти, оптимизации использования ресурсов памяти вычислительных систем, практические навыки по выбору и оптимизации вычислительных ресурсов (ПК-17);

- способность разрабатывать элементы и устройства фотоники и оптоинформатики на основе существующей элементной базы (ПК-20).

Предназначено для студентов очной, очно-заочной и заочной форм, обучающихся по направлению 200700 «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Оптические методы обработки информации».

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
«___» _____ 2014 г.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Методические указания к практическим занятиям
и по самостоятельной работе
для студентов направления 200700 «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик
докт. физ.-мат. наук, проф.
каф. ЭП
_____ С.М. Шандаров
«___» _____ 2014 г.

Содержание

Введение.....	6
Раздел 1 Введение. Фурье-оптика	6
Содержание раздела	6
Методические указания по изучению раздела	7
Вопросы для самопроверки	7
Раздел 2 Оптические транспаранты	7
2.1 Содержание раздела	7
2.2 Методические указания по изучению раздела	8
2.3 Вопросы для самопроверки	8
Раздел 3 Дифракция света на акустических волнах	9
3.1 Содержание раздела	9
3.2 Методические указания по изучению раздела	9
3.3 Вопросы для самопроверки	9
Раздел 4 Фоторефрактивный эффект и динамическая голография	10
4.1 Содержание раздела	10
4.2 Методические указания по изучению раздела	10
4.3 Вопросы для самопроверки	11
Раздел 5 Устройства обработки и хранения информации на основе методов фурье-оптики, акустооптики и динамической голографии	12
5.1 Содержание раздела	12
5.2 Методические указания по изучению раздела	12
5.3 Вопросы для самопроверки	12
6 Лабораторные работы.....	13
7 Темы для самостоятельного изучения	14
8 Темы практических занятий.....	15
9.1. Преобразование Фурье в когерентной оптической системе.....	15
9.1.1 Примеры решения задач по теме «Преобразование Фурье в когерентной оптической системе».....	15
9.1.2 Варианты задач для самоподготовки.....	16
9.2 Дифракция света на фазовых решетках.....	18
9.2.1 Примеры решения задач по теме «Дифракция света на фазовых решетках»	18
9.2.2 Варианты задач для самоподготовки.....	18
9.3. Фоторефрактивный эффект и динамическая голография.....	20

9.3.1. Примеры решения задач по теме «Фоторефрактивный эффект и динамическая голография»	20
9.3.2 Варианты задач для самоподготовки.....	22
Заключение	24
Рекомендуемая литература	26

Введение

Целью преподавания дисциплины «Оптические и акустооптические методы обработки информации» является ознакомление бакалавров с общими физическими принципами фурье-оптики, акустооптики и динамической голографии и освоение студентами методов, используемых при разработке, расчете, эксплуатации и исследованиях оптических, голографических, акустооптических устройств и систем обработки, хранения и передачи информации.

Задачей дисциплины «Оптические и акустооптические методы обработки информации» является приобретение студентами знаний в области физических основ фурье-оптики, акустооптики и динамической голографии, освоение подходов к построению, расчету и реализации оптических, акустооптических и голографических устройств и систем обработки и хранения информации, приобретение навыков оценки их основных характеристик и определения параметров.

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

1. «Физика» (электричество и магнетизм, колебания и волны, оптика, квантовая физика).
2. «Оптическая физика» (уравнения Максвелла, дифракция света, оптика неоднородных сред, оптика анизотропных сред, нелинейная оптика, основы квантовой оптики).
3. «Основы фотоники» (источники сплошного и линейчатого спектра, источники когерентного излучения, устройства управления характеристиками когерентных пучков, приемники излучения).
4. «Квантовая механика» (законы сохранения энергии и квазиимпульса при трехчастичных взаимодействиях).
5. «Оптическое материаловедение» (прохождение оптического излучения через кристаллы; оптические явления в кристаллах; процессы отражения, поглощения и преломления света; сегнетоэлектрические, пьезоэлектрические, пироэлектрические кристаллы).

Раздел 1 Введение. Фурье-оптика Содержание раздела

Предмет дисциплины и её задачи. Предмет Фурье-оптики. Достоинства оптических методов обработки информации. Преобразование Фурье в когерентной оптической системе. Прямое и обратное преобразование Фурье в оптической системе. Интегральные и спектральные преобразования в оптических системах. Интегрирование двумерных функций, фильтрация, подавление

постоянной составляющей, дифференцирование. Вычисление функций свертки и корреляции. Согласованная фильтрация.

Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Введение. Фурье-оптика» следует обратить внимание на подходы к описанию преобразованию световых полей когерентной оптической системой, на различия оптических изображений и их пространственных спектров, на прикладные и исследовательские задачи, решаемые с помощью методов прямого и обратного преобразования Фурье в оптических системах и устройствах.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные достоинства оптических методов обработки информации и чем они обусловлены?
2. Нарисуйте схему когерентной оптической системы, используемой для реализации преобразования Фурье; поясните, где находятся сигнальная и спектральная плоскости.
3. Запишите выражение, связывающее световые поля в фокальных плоскостях положительной линзы.
4. Нарисуйте схему когерентной оптической системы, в которой выполняются прямое и обратное преобразования Фурье. Как изменится двумерный оптический сигнал в выходной плоскости такой системы?
5. Сконструируйте когерентное оптическое устройство, вычисляющее интегралы от двумерных функций, и нарисуйте его схему.
6. Как реализовать пространственную фильтрацию двумерных оптических изображений?
7. Как можно реализовать оптическую систему, вычисляющие функции свертки и корреляции двумерных функций?
8. Поясните суть метода согласованной фильтрации.
9. Нарисуйте схему, поясняющую голографический способ создания согласованного фильтра.
10. Нарисуйте оптическую схему, осуществляющую согласованную фильтрацию двумерного оптического сигнала, и поясните особенности её реализации.

Раздел 2 Оптические транспаранты

2.1 Содержание раздела

Фотопленка как оптический транспарант. Характеристики фотопленки. Фотополимеры, фоторефрактивные и фотохромные

материалы, фототермопластики, как оптические транспаранты. Акустооптический модулятор как оптический транспарант.

2.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптические транспаранты» следует обратить внимание на основные характеристики и свойства оптических материалов, используемых для создания оптических транспарантов и на способы преобразования радиосигналов в оптическую функцию пропускания транспаранта в реальном масштабе времени.

2.3 Вопросы для самопроверки

1. Что такое модуляционная характеристика фотопленки?
2. Что такое кривая почернения фотопленки и коэффициент контрастности фотопленки?
3. Какой участок кривой почернения и фотопленку с каким коэффициентом контрастности необходимо использовать для голографической реализации согласованного фильтра?
4. Что такое фазовая характеристика фотопленки? Как можно скорректировать случайные колебания фазы световой волны, вызванные неоднородностью фотопленки, при реализации оптических транспарантов?
5. Что такое пространственно-частотная характеристика фотоматериала для оптических транспарантов? Каким параметром можно её характеризовать?
6. Что такое чувствительность фотоматериала и в каких единицах она выражается?
7. На каких физических и химических явлениях основана запись оптической информации в фотополимерных материалах?
8. Каковы физические явления, используемые для записи и стирания записанной оптической информации в фотохромных материалах?
9. С какими физическими явлениями связана запись голограмм в фоторефрактивных кристаллах?
10. Как реализуется запись оптических изображений в фототермопластиках?
11. На каких физических явлениях основано применение акустооптических модуляторов в качестве динамических оптических транспарантов?

Раздел 3 Дифракция света на акустических волнах

3.1 Содержание раздела

Качественный анализ дифракции света на акустических волнах. Условия синхронизма, угол Брэгга, возможные применения, аномальная и коллинеарная дифракция. Дифракция Рамана-Ната. Дифракция Брэгга в изотропной среде, метод волнового уравнения. Постановка задачи, вывод уравнений связанных волн, анализ выражений для дифрагированного светового поля. Эффективность дифракции Брэгга. Коэффициент акустооптического качества среды M_2 . Зависимость эффективности дифракции от акустической мощности и размеров пьезопреобразователя. Частотная зависимость акустооптического взаимодействия. Автоподстройка угла Брэгга фазированными преобразователями акустических волн. Аномальная дифракция с широкополосной геометрией.

3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Дифракция света на акустических волнах» следует обратить внимание на качественное описание дифракции света на акустических волнах, на метод волнового уравнения, на подходы к решению уравнений связанных волн, на технические характеристики акустооптических модуляторов и методы их оптимизации.

3.3 Вопросы для самопроверки

1. Запишите условия синхронизма при акустооптическом взаимодействии и поясните их физический смысл.
2. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для дифракции Брэгга в изотропной среде; выведите на её основе соотношение для угла Брэгга.
3. Выразите угол дифракции через частоту световых волн, поясните все обозначения.
4. Перечислите основные явления при дифракции света на акустических волнах, имеющие прикладное значение.
5. Что такое аномальная (анизотропная) дифракция? В каких средах она наблюдается?
6. Что такое коллинеарная дифракция, для чего она может быть использована?
7. Каковы основные особенности дифракции Рамана-Ната?
8. Опишите постановку задачи в методе волнового уравнения, используемого для анализа брэгговской дифракции света на акустических волнах.

9. Опишите основные этапы и приближения, используемые при выводе уравнений связанных волн в методе волнового уравнения.

10. Запишите уравнения связанных волн, описывающие дифракцию света на монохроматической акустической волне, поясните их физический смысл.

11. Опишите подход к решению уравнений связанных волн при дифракции света на акустических волнах.

12. Запишите выражение для эффективности дифракции Брэгга, отражающее её частотную зависимость. Поясните все обозначения.

13. Что характеризует коэффициент акустооптического качества среды M_2 ? Какие акустооптические материалы характеризуются высокими значениями M_2 ?

14. В чем заключается способ автоподстройки угла Брэгга фазированными преобразователями акустических волн? Как его можно реализовать?

15. Каковы особенности аномальной дифракции с широкополосной геометрией?

Раздел 4 Фоторефрактивный эффект и динамическая голография

4.1 Содержание раздела

Качественное описание основных эффектов динамической голографии. Интерференция световых пучков, основные физические процессы при формировании динамических голограмм, основные эффекты динамической голографии. Модель зонного переноса. Схема уровней, система материальных уравнений. Анализ фоторефрактивного эффекта в приближении малых контрастов интерференционной картины. Диффузионный механизм записи фоторефрактивной решетки. Формирование фоторефрактивной решетки в постоянном и знакопеременном внешних электрических полях. Самодифракция световых волн на фоторефрактивных голограммах. Уравнения связанных волн. Приближение неистошаемой накачки. Самодифракция световых волн на фоторефрактивной решетке при локальном и нелокальном типах нелинейного отклика.

4.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Фоторефрактивный эффект и динамическая голография» следует обратить внимание на физические явления, позволяющие записывать динамические голограммы в фоторефрактивных кристаллах; на физическое описание фоторефрактивных явлений в рамках одноуровневой модели зонного

переноса и их математическое описание; на особенности диффузионного механизма перераспределения зарядов и на особенности дрейфовых механизмов; на эффекты перекачки фаз и амплитуд световых волн при их двухволновом взаимодействии; на подходе к описанию эффектов самодифракции на основе уравнений связанных волн; на приближении неистощаемой накачки.

4.3 Вопросы для самопроверки

1. Запишите выражение для распределения интенсивности в интерференционной картине двух плоских световых волн. Поясните все обозначения.

2. Перечислите основные эффекты динамической голографии и дайте им краткую характеристику.

3. Нарисуйте энергетическую диаграмму фоторефрактивного кристалла для одноуровневой модели зонного переноса и поясните физические эффекты, наблюдаемые в таком кристалле при неоднородном освещении.

4. Запишите полную систему уравнений, которая позволяет описать фотоиндуцированное перераспределение пространственного заряда в рамках одноуровневой модели зонного переноса. Поясните все обозначения.

5. В чем суть приближения малых контрастов интерференционной картины, и для чего оно используется?

6. Запишите уравнение, описывающее временную эволюцию для первой гармоники поля пространственного заряда в приближении малых контрастов, квазинепрерывного освещения и низкочастотного внешнего поля. Поясните все обозначения.

7. Нарисуйте примерную зависимость амплитуды поля пространственного заряда от периода фоторефрактивной решетки, для диффузионного механизма переноса заряда. При каком соотношении между диффузионным полем и полем насыщения ловушек эта зависимость имеет максимум?

8. Каковы особенности формирования фоторефрактивных голограмм в приложенном к кристаллу постоянном внешнем поле?

9. Каковы особенности формирования фоторефрактивных голограмм в приложенном к кристаллу знакопеременном внешнем поле?

10. Запишите уравнения связанных волн, описывающих самодифракцию световых пучков на фоторефрактивной решетке. Поясните все обозначения.

11. Получите решение уравнений связанных волн в приближении неистощаемой накачки; поясните особенности используемого при этом подхода.

12. Опишите суть подхода, используемого для перехода от уравнений связанных волн к системе уравнений для интенсивностей взаимодействующих световых волн, в случае нелокального отклика.

13. Запишите соотношение для интенсивности сигнальной волны, взаимодействующей с волной накачки на фоторефрактивной решетке при нелокальном отклике, с учетом истощения накачки. Поясните все обозначения.

14. Поясните термины «перекачка мощности» и «перекачка фазы».

Раздел 5 Устройства обработки и хранения информации на основе методов фурье-оптики, акустооптики и динамической голографии

5.1 Содержание раздела

Одноканальные, двухканальные и многоканальные акустооптические анализаторы спектра радиосигналов. Акустооптические дефлекторы. Акустооптические спектральные фильтры. Голографические системы оптической памяти и распознавания образов. Адаптивные голографические корреляторы. Адаптивные голографические интерферометры на основе попутного и встречного взаимодействия в фоторефрактивных кристаллах.

5.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Устройства обработки и хранения информации на основе методов фурье-оптики, акустооптики и динамической голографии» следует обратить внимание на связь предыдущих разделов дисциплины с основами конструирования, проектирования и эксплуатации прикладных устройств и систем фотоники различного назначения.

5.3 Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте примерную схему одноканального акустооптического анализатора спектра радиосигналов. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

2. Опишите достоинства одноканального акустооптического анализатора спектра радиосигналов перед традиционными радиотехническими устройствами такого же назначения.

3. Опишите принцип действия двухканального анализатора спектра радиосигналов и поясните, какие характеристики он анализирует.

4. Опишите принцип действия многоканального анализатора спектра радиосигналов.

5. Нарисуйте схему перестраиваемого акустооптического спектрального фильтра и поясните его принцип действия.

6. Нарисуйте примерную схему устройства для считывания информации в голографической системе оптической памяти.

7. Поясните принцип голографической системы распознавания оптических изображений.

8. Поясните физические принципы, используемые в адаптивных голографических корреляторах на фоторефрактивных кристаллах.

9. Поясните принцип голографической интерферометрии при встречном взаимодействии световых волн в фоторефрактивных кристаллах, одна из которых является фазово-модулированной.

10. Нарисуйте примерную схему адаптивного голографического интерферометра, предназначенного для измерения амплитуды механических колебаний отражающих объектов.

6 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 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 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 в лаборатории. На этом этапе очень важно, чтобы студент выполнил самостоятельно и грамотно необходимые измерения и наблюдения, укладываясь в отведенное для этого время. При организации своей работы для проведения эксперимента целесообразно исходить из рекомендаций, изложенных в руководствах для выполняемой лабораторной работы.

На последнем этапе работы студент производит обработку данных измерений 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. Исследование фильтра Вандер Люгта
3. Исследование акустооптического модулятора
4. Исследование амплитудной характеристики адаптивного голографического интерферометра в широком динамическом диапазоне

7 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. Вычисление функций свертки и корреляции в оптических системах
2. Фототермопластики, как оптические транспаранты
3. Дифракция Рамана-Ната
4. Аномальная дифракция с широкополосной геометрией
5. Формирование фоторефрактивной решетки в постоянном и знакопеременном внешних электрических полях
6. Голографические системы оптической памяти
7. Голографические системы распознавания образов
8. Акустооптические дефлекторы
9. Акустооптические спектральные фильтры
10. Адаптивные голографические интерферометры на основе попутного взаимодействия в кубических фоторефрактивных кристаллах

Студент защищает реферат по одной выбранной им теме.

8 Темы практических занятий

На практических занятиях студенты рассматривают варианты задач. Целью занятий является углубление понимания процессов, происходящих в системах и устройствах оптической обработки информации. Уделяется внимание таким вопросам, как преобразование Фурье в когерентной оптической системе, дифракция Брэгга, коллинеарная дифракция, диффузионное формирование голограмм в фоторефрактивных кристаллах, самодифракция световых волн, адаптивная голографическая интерферометрия.

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

1. Преобразование Фурье в когерентной оптической системе.
2. Дифракция света на фазовых решетках.
3. Фоторефрактивный эффект и динамическая голография.

9.1. Преобразование Фурье в когерентной оптической системе

9.1.1 Примеры решения задач по теме «Преобразование Фурье в когерентной оптической системе»

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 представляем 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 представляем, как

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

Тогда поле в спектральной плоскости КОС определяется интегралом

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

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

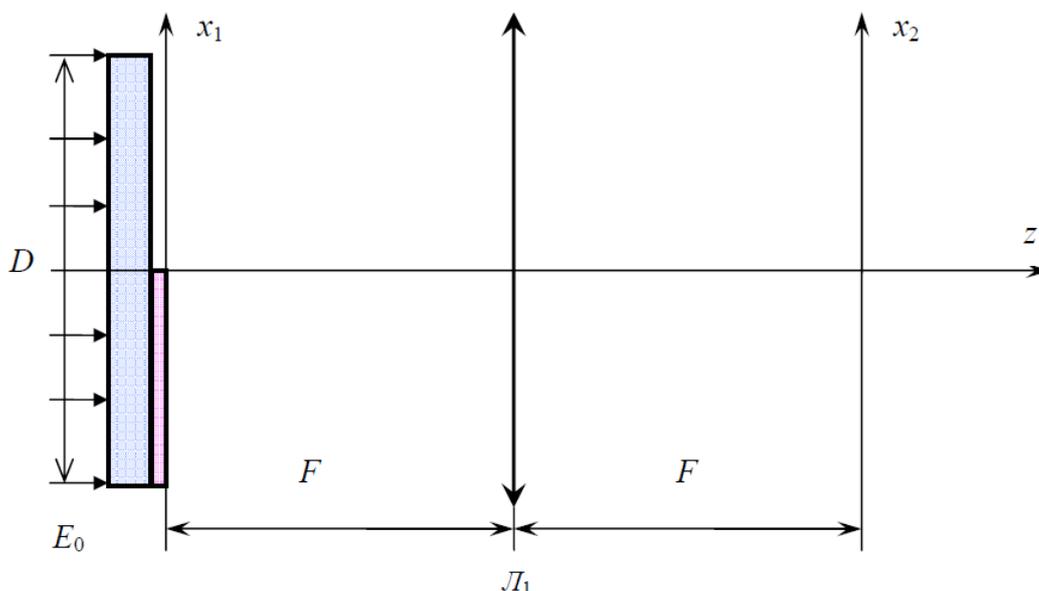
$$E_2(x_2, y_2) = abE_0 \frac{\sin(\pi a x_2 / \lambda F)}{(\pi a x_2 / \lambda F)} \cdot \frac{\sin(\pi b y_2 / \lambda F)}{(\pi b y_2 / \lambda F)}.$$

9.1.2 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 помещен транспарант, состоящий из стеклянной пластины и диэлектрической пленки с толщиной h и показателем преломления n , причем пленка расположена при $x_1 \leq 0$. Апертура светового пучка равна D вдоль оси x_1 и не ограничена вдоль оси y_1 .



4. Провести анализ распределения амплитуды и интенсивности света в спектральной плоскости для рассмотренной в предыдущей задаче 1 когерентной оптической системы при $h = \lambda / [2(n-1)]$, $\lambda = 650$ нм, $D = 6,5$ мм и $F = 20$ см.

5. 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.

6. Найдите в аналитическом виде распределение поля в когерентной оптической системе в спектральной плоскости, если в сигнальной плоскости при $y_1 = \pm y_0$ находятся два точечных источника света. Проведите анализ распределения амплитуды и интенсивности света в спектральной плоскости для $x_0 = 50$ мкм, $\lambda = 532$ нм и $F = 25$ см.

7. Найдите в аналитическом виде распределение поля в когерентной оптической системе в спектральной плоскости, если в сигнальной плоскости помещен транспарант, представляющий тонкий непрозрачный экран с двумя одинаковыми отверстиями прямоугольной формы, центры которых расположены при $y_1 = \pm d_0 = \pm 1$ мм, а размеры отверстий равны $a = 4$ мм по оси x_1 и $b = 0,2$ мм по оси y_1 . Проведите анализ распределения амплитуды и интенсивности света в спектральной плоскости для $\lambda = 650$ нм и $F = 20$ см.

8. Найдите в аналитическом виде распределение поля в когерентной оптической системе в спектральной плоскости, если в сигнальной плоскости помещен транспарант, представляющий тонкий непрозрачный экран с двумя одинаковыми отверстиями прямоугольной формы, центры которых расположены при $x_1 = \pm c_0 = \pm 0,5$ мм, а размеры отверстий равны $a = 0,1$ мм по оси x_1 и $b = 1,2$ мм по оси y_1 . Проведите анализ распределения амплитуды и интенсивности света в спектральной плоскости для $\lambda = 633$ нм и $F = 40$ см.

9.2 Дифракция света на фазовых решетках

9.2.1 Примеры решения задач по теме «Дифракция света на фазовых решетках»

Задача 1. 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 = $5,86^\circ$.

Ответ: Угол, на который в кристалле дифрагированный пучок отклоняется от падающего, равен $0,102$ рад = $5,86^\circ$.

9.2.2 Варианты задач для самоподготовки

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Рассчитайте значение коэффициента качества M_2 для акустооптического материала с показателем преломления $n=2,2$ и плотностью $\rho = 4,64$ г/см³ для взаимодействия с акустической волной, имеющей скорость распространения $v_a = 4 \cdot 10^3$ м/с, при значении эффективной фотоупругой постоянной $p_{eff}=0,25$.

5. Рассчитайте частотную зависимость эффективности дифракции для акустооптического модулятора с размером пьезопреобразователя $d=3$ мм вдоль направления распространения света, с центральной частотой $f_0 = 250$ МГц, скоростью распространения продольной акустической волны $v_a = 6,4 \cdot 10^3$ м/с и показателем преломления $n_0=2,2$ на рабочей длине волны $\lambda = 650$ нм.

6. Рассчитайте максимальную эффективность дифракции Брэгга в акустооптическом модуляторе с параметрами $M_2=10^{-17}$ с³/кг, $d=3$ мм, $h=0,5$ мм, $P_a=100$ мВт, на длине волны $\lambda = 650$ нм.

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 характеризуется пространственным периодом 3 мкм и амплитудой модуляции показателя преломления $\Delta n_m = 2 \times 10^{-6}$ для излучения с длиной волны 655 нм, при невозмущенном показателе преломления $n^{(0)} = 2,195$.

Для кристалла с толщиной 10 мм найдите:

1. Максимальную дифракционную эффективность голограммы η_m .

2. Спектральную селективность голограммы, по уровню 0,1 η_m .

9. 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.

9.3. Фоторефрактивный эффект и динамическая голография

9.3.1. Примеры решения задач по теме «Фоторефрактивный эффект и динамическая голография»

Задача 1. Две плоские монохроматические волны 1 и 2 с длиной волны $\lambda = 532$ нм и амплитудами $E_{m1} = 1$ В/м и $E_{m2} = 25$ В/м, поляризованные вдоль оси Z , распространяются в среде с показателем преломления $n = 2,6$. Волновые векторы волн \vec{k}_1 и \vec{k}_2 лежат в плоскости XU и составляют с осью $+X$ углы $\theta_1 = 5^\circ$ и $\theta_2 = -5^\circ$, соответственно.

Найдите распределение интенсивности в картине интерференции этих волн, определите период интерференционной картины и глубину модуляции интенсивности $m = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$.

Решение. Используя комплексную форму записи электрического поля световых волн, распространяющихся в произвольном направлении $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_m \exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})]$, запишем выражения для полей волн 1 и 2 с заданными ориентациями волновых векторов и вектора поляризации, как

$$\begin{aligned}\dot{\vec{E}}_1(\vec{r}, t) &= \dot{E}_{m1} \vec{k}^0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \right\}, \\ \dot{\vec{E}}_2(\vec{r}, t) &= \dot{E}_{m2} \vec{k}^0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta - y \sin \theta) \right] \right\},\end{aligned}$$

где введен угол $\theta = \theta_1 = -\theta_2$. Полное световое поле в среде является линейной суперпозицией полей этих волн: $\dot{\vec{E}}(\vec{r}, t) = \dot{\vec{E}}_1(\vec{r}, t) + \dot{\vec{E}}_2(\vec{r}, t)$. Усредненная по периоду светового поля интенсивность определяется выражением $I(\vec{r}) = \left| \dot{\vec{E}}(\vec{r}, t) \right|^2 = \dot{\vec{E}}(\vec{r}, t) \cdot \dot{\vec{E}}^*(\vec{r}, t)$, представляющим скалярное произведение комплексной векторной функции на её комплексно-сопряженную величину. Используя данные соотношения, находим распределение интенсивности:

$$\begin{aligned}I(\vec{r}) &= \left(\dot{E}_{m1} \vec{k}^0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \right\} + \dot{E}_{m2} \vec{k}^0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta - y \sin \theta) \right] \right\} \right) \cdot \\ &\cdot \left(\dot{E}_{m1}^* \vec{k}^0 \exp \left\{ -i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \right\} + \dot{E}_{m2}^* \vec{k}^0 \exp \left\{ -i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta - y \sin \theta) \right] \right\} \right) = \\ &= \left| \dot{E}_{m1} \right|^2 + \left| \dot{E}_{m2} \right|^2 + \dot{E}_{m1} \dot{E}_{m2}^* \exp \left[-i \frac{4\pi}{\lambda} n y \sin \theta \right] + \dot{E}_{m2} \dot{E}_{m1}^* \exp \left[i \frac{4\pi}{\lambda} n y \sin \theta \right].\end{aligned}$$

Учитывая действительный характер заданных амплитуд E_{m1} и E_{m2} , получаем следующее окончательное выражение для распределения интенсивности в интерференционной картине:

$$\begin{aligned}I(y) &= E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos \left[\left(\frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right) y \right] = \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} y \right],\end{aligned}$$

где использованы обозначения $I_{1,2} = \left| \dot{E}_{m1,m2} \right|^2 = E_{m1,m2}^2$ – интенсивности интерферирующих волн 1 и 2 и $\Lambda = \lambda / (2n \sin \theta)$ – пространственный период интерференционной картины.

С учетом условий задачи, получаем $\Lambda = 1174$ нм и $m = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2) = 0,385$.

Ответ: 1. Распределение интенсивности в интерференционной картине:

$$I(y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} y \right].$$

2. Пространственный период интерференционной картины $\Lambda = 1174$ нм.

3. Глубина модуляции интенсивности $m = 0,385$.

9.3.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Две плоские монохроматические волны 1 и 2 с длиной волны $\lambda = 633$ нм и амплитудами $E_{m1} = 10$ В/м и $E_{m2} = 200$ В/м, поляризованные в плоскости XU , распространяются в немагнитной среде с коэффициентом преломления $n = 2,55$. Волновые векторы волн \vec{k}_1 и \vec{k}_2 ориентированы в плоскости XU и составляют с осью $+X$ углы $\theta_1 = 10^\circ$ и $\theta_2 = 170^\circ$, соответственно. Запишите выражения для распределения электрического поля в среде, используя комплексную форму записи.

2. Используя выражение для распределения электрического поля, полученное в предыдущей задаче **1**, найдите распределение интенсивности светового поля в среде и проведите его анализ: Определите направление волнового вектора интерференционной картины, её контраст и пространственный период.

3. В кристалле титаната висмута, имеющем относительную статическую диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 47$, интерференционной картиной с контрастом $m = 2 \cdot 10^{-4}$ создано распределение ионизированных доноров $N_D^+(x) = N_{D0}^+ + N_{Dm}^+ \sin(Kx)$ с амплитудой первой пространственной гармоники $N_{Dm}^+ = 2 \cdot 10^{20}$ м⁻³ и периодом $\Lambda = 1$ мкм. Найдите распределение электрического поля в кристалле и амплитуду его первой пространственной гармоники.

4. В кристалле ниобата лития, легированном Fe и имеющем относительную статическую диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 29$, при записи отражательной фазовой голограммы создано распределение электрического поля $E(z) = E_{ph0} + E_1 \cos(Kz)$, с амплитудой первой пространственной гармоники $E_1 = 10$ кВ/см и пространственным периодом 116 нм. Найдите распределение концентрации ионизированных доноров в этом кристалле и амплитуду первой пространственной гармоники в найденном распределении.

5. В кристалле силиката висмута с полной концентрацией доноров $N_D = 10^{25}$ м⁻³ и акцепторов $N_A = 10^{22}$ м⁻³, сечением фотоионизации $S = 1 \cdot 10^{-5}$ м²/Дж, найдите начальное значение концентрации ионизированных доноров и начальную скорость её роста, при включении в момент времени $t = 0$ опорного пучка с интенсивностью $I_0 = 100$ мВт/см².

6. В кристалле титаната висмута (класс симметрии 23) среза (100), имеющем показатель преломления $n_0 = 2.58$ и электрооптический коэффициент $r_{41} = 5$ пм/В на длине волны 633 нм,

сформирована отражательная фоторефрактивная решетка с распределением электрического поля $\vec{E}^0(x) = \vec{x}^0 E^{m0} \cos(Kx)$, пространственным периодом $\Lambda = 123$ нм и амплитудой $E^{m0} = 2$ кВ/см. Найдите волновое число K и все компоненты тензора диэлектрической проницаемости данного кристалла, принимая во внимание линейный электрооптический эффект.

7. Используя условия, заданные в предыдущей задаче, выведите выражение для распределения градиента электрического поля отражательной фоторефрактивной решетки и найдите амплитудное значение этого градиента напряженности.

8. Фоторефрактивная голограмма записывается за счет диффузионного механизма в кристалле силиката висмута с показателем преломления $n_0 = 2.55$, концентрацией компенсирующих акцепторов $N_A = 10^{22}$ м⁻³, относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon^r = 56$ и эффективной электрооптической постоянной $r_{eff} = 5$ пм/В двумя когерентными световыми пучками с длиной волны 633 нм.

Определите:

1. Оптимальный пространственный период голограммы, при котором амплитуда поля пространственного заряда E_{SC} максимальна.
2. Диффузионное поле, поле насыщения насыщения ловушек и поле E_{SC} при оптимальном пространственном периоде голограммы.
3. Угол между пучками в воздухе, при котором реализуется голограмма с оптимальным пространственным периодом.
4. Экспоненциальный коэффициент двухпучкового усиления для оптимального пространственного периода.

9. Встречное взаимодействие световой волны накачки (P) с правой круговой поляризацией, распространяющейся вдоль оси x , и сигнальной волны (S) с левой круговой поляризацией, распространяющейся в противоположном направлении в фоторефрактивном кристалле симметрии 23 среза (111), описывается следующими уравнениями для комплексных амплитуд:

$$\frac{dC_{S1}}{dx} = -\frac{1}{4} \Gamma_{ph} m C_{P2} \exp(-\alpha x),$$

$$\frac{dC_{P2}}{dx} = -\frac{1}{4} \Gamma_{ph} m^* C_{S1} \exp(\alpha x),$$

где контраст интерференционной картины определяется как

$$m(x) = \frac{2C_{S1} C_{P2}^*}{|C_{P2}|^2 \exp(-\alpha x) + |C_{S1}|^2 \exp(\alpha x)},$$

Γ_{ph} - коэффициент двухпучкового усиления и α - коэффициент

оптического поглощения кристалла.

Выведите систему уравнений для интенсивностей взаимодействующих волн.

Заключение

В итоге изучения тем студент должен твердо знать ответы, как минимум, на следующие вопросы.

1. Запишите выражение, связывающее световые поля в фокальных плоскостях положительной линзы. Поясните все обозначения.

2. Нарисуйте схему когерентной оптической системы, в которой выполняются прямое и обратное преобразования Фурье. Как изменится двумерный оптический сигнал в выходной плоскости такой системы?

3. Как реализовать пространственную фильтрацию двумерных оптических изображений?

4. Поясните суть метода согласованной фильтрации.

5. Нарисуйте схему, поясняющую голографический способ создания согласованного фильтра.

6. Что такое модуляционная характеристика фотопленки?

7. Что такое кривая почернения фотопленки и коэффициент контрастности фотопленки?

8. Что такое чувствительность фотоматериала и в каких единицах она выражается?

9. На каких физических и химических явлениях основана запись оптической информации в фотополимерных материалах?

10. Каковы физические явления, используемые для записи и стирания записанной оптической информации в фотохромных материалах?

11. Как реализуется запись оптических изображений в фототермопластиках?

12. На каких физических явлениях основано применение акустооптических модуляторов в качестве динамических оптических транспарантов?

13. Запишите условия синхронизма при акустооптическом взаимодействии и поясните их физический смысл.

14. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для дифракции Брэгга в изотропной среде; выведите на её основе соотношение для угла Брэгга.

15. Перечислите основные явления при дифракции света на акустических волнах, имеющие прикладное значение.

16. Что такое аномальная (анизотропная) дифракция? В каких средах она наблюдается?

17. Что такое коллинеарная дифракция, для чего она может быть использована?

18. Запишите уравнения связанных волн, описывающие дифракцию света на монохроматической акустической волне, поясните их физический смысл.

19. Что характеризует коэффициент акустооптического качества среды M_2 ?

20. В чем заключается способ автоподстройки угла Брэгга фазированными преобразователями акустических волн? Как его можно реализовать?

21. Перечислите основные эффекты динамической голографии и дайте им краткую характеристику.

22. Нарисуйте энергетическую диаграмму фоторефрактивного кристалла для одноуровневой модели зонного переноса и поясните физические эффекты, наблюдаемые в таком кристалле при неоднородном освещении.

23. В чем суть приближения малых контрастов интерференционной картины, и для чего оно используется?

24. Нарисуйте примерную зависимость амплитуды поля пространственного заряда от периода фоторефрактивной решетки, для диффузионного механизма переноса заряда. При каком соотношении между диффузионным полем и полем насыщения ловушек эта зависимость имеет максимум?

25. Запишите уравнения связанных волн, описывающих самодифракцию световых пучков на фоторефрактивной решетке. Поясните все обозначения.

26. Поясните термины «самодифракция», «перекачка мощности» и «перекачка фазы».

27. Нарисуйте примерную схему одноканального акустооптического анализатора спектра радиосигналов. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

28. Нарисуйте схему перестраиваемого акустооптического спектрального фильтра и поясните его принцип действия.

29. Поясните принцип голографической интерферометрии при встречном взаимодействии световых волн в фоторефрактивных кристаллах, одна из которых является фазово-модулированной.

30. Нарисуйте примерную схему адаптивного голографического интерферометра, предназначенного для измерения амплитуды механических колебаний отражающих объектов.

Рекомендуемая литература

1. 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.
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. Информационная оптика / Под ред. Н.Н. Евтихеева. Учебное пособие – М., Издательство МЭИ, 2000. - 516 с.
4. Пуговкин А.В., Серебренников Л.Я., Шандаров С.М. Введение в оптическую обработку информации. – Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
5. Шепелевич В.В. Введение в когерентную оптику и голографию. – Минск: Выш. шк., 1985.
6. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.
7. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. - М.: Радио и связь, 1990. - 225 с.
8. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. Ку-лакова С.В.– М.: Радио и связь, 1989, 136 с.
9. Стурман Б.И., Фридкин В.М. Фотогоальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления. _ М.: Наука, 1992.
10. Взаимодействие световых волн на отражательных голографических решетках в кубических фоторефрактивных кристаллах : сборник статей / Е. Ю. Агеев [и др.] ; ред.: С. М. Шандаров, А. Л. Толстик ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2007. - 99 с.
11. 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.
12. С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, Ю.Н. Кульчин, Р.В. Ромашко, А.Л. Толстик, В.В. Шепелевич. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2008. –Т. 38, №11. – С. 1059-1069.
13. А.А. Kamshiln, R.V. Romashko, Yu.N. Kulchin. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. – 2009. – V. 105. – P. 031101.

14. А.А. Колегов, С.М. Шандаров, Г.В. Симонова, Л.А. Кабанова, Н.И. Буримов, С.С. Шмаков, В.И. Быков, Ю.Ф. Каргин. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 9. – С. 847-852.

15. Шандаров С.М., Шмаков С.С., Буримов Н.И., Сюваева О.С., Каргин Ю.Ф., Петров В.М. Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т.95, вып. 12. – С. 699-702.

16. Исследование амплитудной характеристики адаптивного голографического интерферометра в широком динамическом диапазоне : Методические указания к лабораторной работе / Шандаров С. М., Шмаков С. С. – Томск: ТУСУР, 2014. – 16 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/>

17. Исследование фильтра Вандер Люгта: Методические указания к лабораторной работе / Башкиров А. И. – Томск: ТУСУР, 2014. - 9 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/4126>

18. 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>

19. Исследование акустооптического модулятора: Методические указания к лабораторной работе / Шандаров С. М., Буримов Н.И. – Томск: ТУСУР, 2014. – 12 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/>

Учебное пособие

Шандаров Станислав Михайлович

Оптические и акустооптические методы обработки информации

Методические указания по самостоятельной работе

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40