

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Адаптивный интерферометр на основе фоторефрактивного кристалла

УДК 681.787:535.32

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158Т82	Пэн Тяньтянь		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Р.В.Литвинов	к.ф-м.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Авдеева Ирина Ивановна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Е.И.	к.т.н., доцент		

Томск – 2022 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять естественнонаучные и общепрофессиональные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
ОПК(У)-2	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов
ОПК(У)-3	Способен использовать современные информационные технологии, технику, прикладные программные средства при решении задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-4	Способен участвовать в разработке обобщенных вариантов решения проблем, связанных с автоматизацией производств, выборе на основе анализа вариантов оптимального прогнозирования последствий решения
ОПК(У)-5	Способен участвовать в разработке технической документации, связанной с профессиональной деятельностью
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность к формированию технических требований и заданий на проектирование и конструирование оптических и оптико-электронных приборов, комплексов и их составных частей
ПК(У)-2	Способность к математическому моделированию процессов и объектов оптоэлектроники и их исследованию на базе профессиональных пакетов

	автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов
ПК(У)-3	Готов применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов, современные методы разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых технологий, средства автоматизации технологических процессов и производств
ПК(У)-4	Способен участвовать в постановке целей проекта (программы), его задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях, разработке структуры его взаимосвязей, определении приоритетов решения задач с учетом правовых и нравственных аспектов профессиональной деятельности, в разработке проектов изделий с учетом технологических, конструкторских, эксплуатационных, эстетических, экономических и управленческих параметров, в разработке проектов модернизации действующих производств, создании новых, в разработке средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством в соответствии с техническими заданиями и использованием стандартных средств автоматизации расчетов и проектирования
ПК(У)-5	Способен участвовать в разработке (на основе действующих стандартов и другой нормативной документации) проектной и рабочей технической документации в области автоматизации технологических процессов и производств, их эксплуатационному обслуживанию, управлению жизненным циклом продукции и ее качеством, в мероприятиях по контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации действующим стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам
ПК(У)-6	Способен участвовать в разработке (на основе действующих стандартов и другой нормативной документации) проектной и рабочей технической документации в области автоматизации технологических процессов и производств, их эксплуатационному обслуживанию, управлению жизненным циклом продукции и ее качеством, в мероприятиях по контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации действующим стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам
ПК(У)-7	Способен участвовать в разработке проектов по автоматизации производственных и технологических процессов, технических средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, в практическом освоении и совершенствовании данных процессов, средств и систем
ПК(У)-8	Способен выполнять работы по автоматизации технологических процессов и производств, их обеспечению средствами автоматизации и управления, готовностью использовать современные методы и средства автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством
ПК(У)-9	Способен определять номенклатуру параметров продукции и технологических процессов ее изготовления, подлежащих контролю и измерению, устанавливать оптимальные нормы точности продукции, измерений и достоверности контроля, разрабатывать локальные поверочные схемы и выполнять проверку и отладку систем и средств

	автоматизации технологических процессов, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, а также их ремонт и выбор; осваивать средства обеспечения автоматизации и управления
ПК(У)-10	Способен проводить оценку уровня брака продукции, анализировать причины его появления, разрабатывать мероприятия по его предупреждению и устранению, по совершенствованию продукции, технологических процессов, средств автоматизации и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, систем экологического менеджмента предприятия, по сертификации продукции, процессов, средств автоматизации и управления
ПК(У)-11	Способен участвовать: в разработке планов, программ, методик, связанных с автоматизацией технологических процессов и производств, управлением процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, инструкций по эксплуатации оборудования, средств и систем автоматизации, управления и сертификации и другой текстовой документации, входящей в конструкторскую и технологическую документацию, в работах по экспертизе технической документации, надзору и контролю за состоянием технологических процессов, систем, средств автоматизации и управления, оборудования, выявлению их резервов, определению причин недостатков и возникающих неисправностей при эксплуатации, принятию мер по их устранению и повышению эффективности использования
ПК(У)-18	Способен аккумулировать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области автоматизации технологических процессов и производств, автоматизированного управления жизненным циклом продукции, компьютерных систем управления ее качеством
ПК(У)-19	Способен участвовать в работах по моделированию продукции, технологических процессов, производств, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством с использованием современных средств автоматизированного проектирования, по разработке алгоритмического и программного обеспечения средств и систем автоматизации и управления процессами
ПК(У)-20	Способен проводить эксперименты по заданным методикам с обработкой и анализом их результатов, составлять описания выполненных исследований и подготавливать данные для разработки научных обзоров и публикаций
ПК(У)-21	Способен составлять научные отчеты по выполненному заданию и участвовать во внедрении результатов исследований и разработок в области автоматизации технологических процессов и производств, автоматизированного управления жизненным циклом продукции и ее качеством
ПК(У)-22	Способен участвовать: в разработке программ учебных дисциплин и курсов на основе изучения научной, технической и научно-методической литературы, а также собственных результатов исследований; в постановке и модернизации отдельных лабораторных работ и практикумов по дисциплинам профилей направления; способностью проводить отдельные виды аудиторных учебных занятий (лабораторные и практические), применять новые образовательные технологии, включая системы компьютерного и дистанционного обучения

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
158T82	Пэн Тяньтянь

Тема работы:

Адаптивный интерферометр на основе фоторефрактивного кристалла	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№47-7/с от 16.02.2022 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.22
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p>	<p>Объект исследования: Адаптивный интерферометр</p> <p>Цель работы: Бесконтактный неразрушающий контроль механических колебаний в микроэлектронике и наноэлектронике</p> <p>Режим работы: Непрерывный.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Модель взаимодействия световых волн в фоторефрактивных кристаллах 2. Формирование поля пространственного заряда 3. Уравнения связанных волн 4. Общее решение уравнений относительно коэффициента модуляции и амплитуды поля пространственного заряда 5. Принципы работы адаптивного фоторефрактивного коррелятора и интерферометра

	6. Амплитудные характеристики адаптивного фоторефрактивного интерферометра в линейном и квадратичном режимах
Перечень графического материала	1. Векторная диаграмма встречного двухволнового взаимодействия 2. Схема встречного двухпучкового взаимодействия 3. Схема интерферометра показана
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Былкова Татьяна Васильевна, доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Авдеева И.И., Старший преподаватель ООД ИШИТР
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.06.2022
---	------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Р.В.Литвинов	к.ф.-м.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158Т82	Пэн Тяньтянь		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Уровень образования – Бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения – Весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2022
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.05.2022	Основная часть	60
30.05.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
30.05.2022	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Р.В.Литвинов	к.ф-м.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Е.И.	к.т.н., доцент		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Студенту:

Группа 158Т82		ФИО Пэн Тяньтянь	
Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств в нефтегазовой отрасли

Тема ВКР:

Адаптивный интерферометр на основе фоторефрактивного кристалла	
Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней рыночной стоимости. Оклады в соответствии с окладами сотрудников организации.
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30% районный коэффициент
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	30% отчисления во внебюджетные фонды
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Представить возможные альтернативы проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Разработать план научно-исследовательских работ и рассчитать затраты.
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определить интегральный показатель эффективности научного исследования
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИ 5. Оценка ресурсной, финансовой эффективности НИ 	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158Т82	Пэн Тяньтянь		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
158Т82		Пэн Тяньтянь	
Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств в нефтегазовой отрасли

Тема ВКР:

Проектирование автоматизированной системы блока факельных сепараторов высокого давления установки комплексной подготовки газа	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Введение	<p><i>Объект исследования <u>Адаптивный интерферометр</u></i> <i>Область применения <u>Бесконтактный неразрушающий контроль механических колебаний в микроэлектронике и наноэлектронике</u></i> <i>Рабочая зона: <u>офис</u></i> <i>Размеры помещения (климатическая зона*)</i> <u>8×4=32m²</u> <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны <u>три компьютера</u></i> <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне <u>читайте литературу, собирайте данные, затем запускайте компьютерное моделирование</u></i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:	<p>ГОСТ 12.1.005–88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»; ГОСТ 23337–2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий»; Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022)</p>
2. Производственная безопасность при эксплуатации:	<p>Опасные факторы: Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий; Факторы, связанные с повышенным образованием электростатических зарядов Короткое замыкание Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов; Вредные факторы: 1. Повышенный уровень шума; 2. Повышенный уровень вибрации; 3. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения; 4. Монотонность труда 5. Нагрузка на зрительный анализатор;</p>

	<p>6. Работа с вредными веществами;</p> <p>7. Микроклимат.</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: вытяжка, экранированная зона, ограниченное время работы с установкой</p>
<p>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения:</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: отсутствует.</p> <p>Воздействие на литосферу: в виде отходов, возникших при поломке персонального компьютера, люминесцентных ламп и других электроприборов. Также стоит учесть отходы макулатуры.</p> <p>Воздействие на гидросферу: продукты жизнедеятельности персонала.</p> <p>Воздействие на атмосферу: отсутствует.</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения:</p>	<p>Возможные ЧС:</p> <p>Природные катастрофы (наводнения, цунами, ураган и т.д.);</p> <p>Геологические воздействия (землетрясения, оползни, обвалы, провалы территории и т.д.);</p> <p>Техногенные аварии (обрушение производственного здания или оборудования, пожар)</p> <p>Наиболее актуальная ЧС:</p> <p>Возникновение пожара.</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Авдеева Ирина Ивановна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
158Т82	Пэн Тяньтянь		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 72 страницы машинописного текста, 10 таблиц, 16 рисунков, 1 список использованных источников из 19 наименований, 1 альбом графической документации.

Объектом исследования является адаптивный голографический интерферометр для измерения вибрации объектов на больших расстояниях.

Цель работы – при помощи лазерных интерферометров, преобразующих фазовую модуляцию света в модуляцию его интенсивности.

В данном проекте была фазово-интенсивная модуляция, объясненная встречными двухволновыми взаимодействиями в циклотронно-кубическом фоторефрактивном кристалле силиката висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$.

Проект может быть использован для создания адаптивных интерферометров различного назначения, способных с высокой точностью измерять механические колебания отражающих поверхностей.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	14
1 ВСТРЕЧНОЕ ДВУХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ГИРОТРОПНОМ КУБИЧЕСКОМ ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ СИММЕТРИИ 23	18
1.1 Модель взаимодействия	18
1.2 Формирование поля пространственного заряда	22
1.3 Уравнения связанных волн	26
2 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПРИБЛИЖЕНИИ НЕИСТОЩИМОЙ НАКАЧКИ	29
2.1 Общее решение уравнений относительно коэффициента модуляции и амплитуды поля пространственного заряда	29
2.2 Пространственно-временная трансформация амплитуды поля пространственного заряда при фазовой синусоидальной модуляции слабой сигнальной волны.....	31
2.3 Интенсивность слабой сигнальной волны при начальной синусоидальной фазовой модуляции в установившемся периодическом режиме	34
3 АДАПТИВНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО КРИСТАЛЛА ТИТАНАТА ВИСМУТА.....	39
3.1 Принципы работы адаптивного фоторефрактивного коррелятора и интерферометра	39
3.2 Выбор ориентации взаимодействия относительно кристаллофизических осей кристалла ВТО	42
3.3 Управление частотой временной модуляции слабой сигнальной волны за счет специального выбора толщины кристалла и специального выбора угла ее поляризации	43
3.4 Адаптивный фоторефрактивный интерферометр в линейном и квадратичном режимах фазовой демодуляции	45
3.5 Амплитудные характеристики адаптивного фоторефрактивного интерферометра в линейном и квадратичном режимах	48
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	53
4.1 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	53
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	54

4.3 Бюджет научно-технического исследования	56
4.3.1 Расчет затрат на материалы	56
4.3.2 Расчет амортизационных расходов	56
4.3.3 Расчет заработной платы	57
4.3.4 Расчет прочих расходов	58
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	58
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	61
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	61
5.2 Производственная безопасность «Лазерное измерение» месторождения	62
5.3 Экологическая безопасность	63
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
ЛИТЕРАТУРА	68
Приложение А (обязательное) поэтажная схема	70
Приложение Б (обязательное) Схема встречного двухпучкового взаимодействия	71
Приложение В (обязательное) Схема интерферометра	72

ВВЕДЕНИЕ

Эффект преломления можно понимать как изменение показателя преломления среды под действием светового поля, что является основной причиной действия света в преломляющей среде.

В отсутствие пьезоэффектов при малых оптических мощностях аналитические результаты взаимодействия пучков в фоторефрактивных кристаллах и их сравнение с экспериментальными данными (см., например, [1-7]) позволяют представить динамику в этом случае рассеяния света происходит в виде следующих взаимосвязанных фундаментальных физических процессов:

- неоднородное фотовозбуждение (примесное или собственное) свободных носителей заряда (электронов в зону проводимости, дырок в валентную зону);
- перемещение фотовозбужденных носителей по кристаллу за счет диффузии, дрейфа во внешнем и внутреннем электрическом поле, фотогальванического эффекта;
- захват свободных носителей заряда ловушками и формирование электрического поля пространственного заряда;
- пространственная и временная модуляция диэлектрической проницаемости кристалла за счет линейного электрооптического эффекта внутренним и внешним электрическими полями;
- обратное влияние модуляции диэлектрической проницаемости среды на световое поле.

Везде внизу если особых оговорок не делает эффект преломления в асимметричных кристаллах (и в общем случае по понятию преломления) имеется в виду совокупность процессов, перечисленных выше.

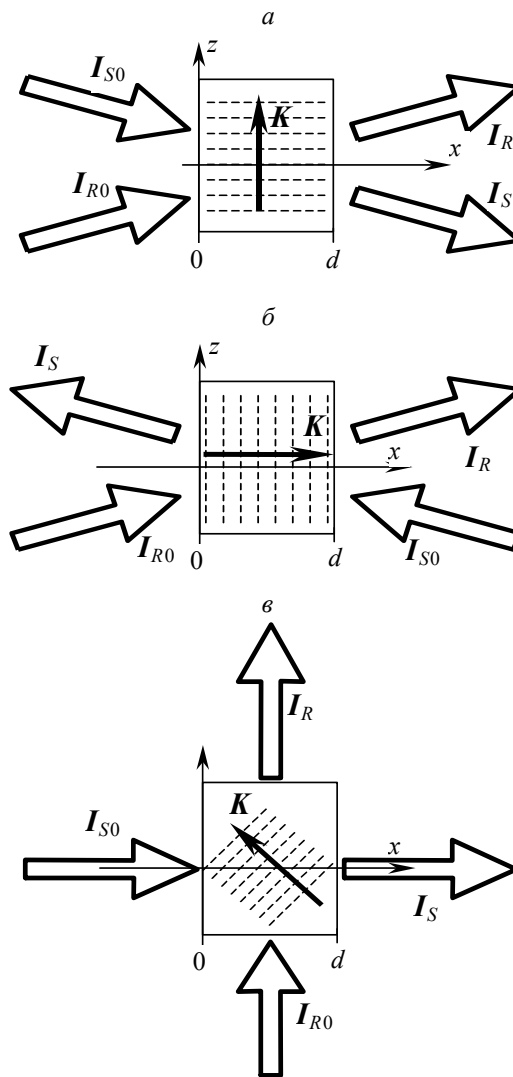
В выполненных к настоящему времени исследованиях наиболее популярными являются попутная (рисунок 0.1а) и встречная (рисунок 0.1б) схемы взаимодействия (см., например, [1-7]). В экспериментальных условиях двухволновое взаимодействие чаще всего реализуется по пропускающей схеме (рисунок 0.1а). В этом случае световые пучки, записывающие фоторефрактивную голограмму, падают на одну и ту же грань

кристаллического образца. В случае отражательной геометрии записывающие пучки падают на противоположные грани (рисунок 0.1б). В работах [8, 9] исследовалось взаимодействие световых пучков падающих на ортогональные грани образца (см. рисунок 0.1в).

В отличие от данной фазовой дифракционной решетки, градиация преломления, происходящего в кристалле между взаимодействием двух волн по отношению к световым волнам. Амплитуда световой волны и амплитуда решетки динамически связаны, поэтому процесс, при котором световая волна одновременно рассеивается на сетке одновременного преломления, называется дифракцией. Самодифракция световых лучей на преломляющей сетке вызывает изменения интенсивности, фазы и состояния поляризации по сравнению с отсутствием взаимодействий.

В работах [1, 2, 4, 11, 12] было предложено использовать самодифракцию световых волн при встречном взаимодействии для создания адаптивных лазерного интерферометров и коррелятора.

Лазерные интерферометры, реализующие преобразование фазовой модуляции света в модуляцию интенсивности света, позволяет с высокой точностью измерять механические колебания отражающих поверхностей. Предельная чувствительность классического интерферометра к амплитуде измеряемых вибраций ограничена дробовыми шумами фотодетектора. Однако в реальных устройствах высокая чувствительность может сказываться отрицательно, делая интерферометрическую измерительную систему подверженной влиянию параметров окружающей среды (температуры, механических вибраций, давления и т. п.). Кроме того, в интерферометре должен поддерживаться постоянный средний фазовый сдвиг между сигналом и опорной волной, чтобы обеспечить линейную зависимость между сигналом, извлеченным фотодетектором, и измеренной амплитудой колебаний.



\mathbf{K} – вектор фоторефрактивной решетки. I_{S0} и I_{R0} – интенсивности падающих световых волн. I_R и I_S – интенсивность прошедших волн.

Рисунок 0.1 – Различные схемы двухпучкового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле.

Предложения по использованию голограмм в преломляющих кристаллах для интерферометрического преобразования фазово-амплитудной модуляции [14] получили развитие в ряде работ (см., например, [4, 11, 12, 14, 15]). отраженная голограмма и ограниченная скорость среды при перезаписи позволяют адаптивно обрабатывать стационарную моду поля свет в лазерном интерферометре. Он обеспечивает эффективную фазовую демодуляцию и сопротивление низкочастотной модуляции за счет компенсации изменения внешних условий.

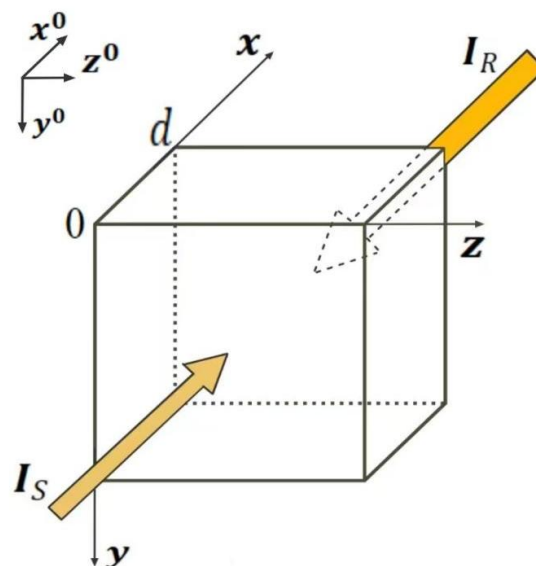
В настоящей работе рассмотрены основные физические процессы при фоторефрактивном эффекте в гиротропных кристаллах

симметрии 23. Проведен теоретический анализ и численное моделирование встречного двухволнового взаимодействия. Исследованы особенности этого взаимодействия при фазовой модуляции одного из пучков, падающих на кристалл. Выполнен анализ адаптивного интерферометра, реализуемого на основе динамических отражательных голограмм, сформированных в кубических фоторефрактивных кристаллах силленитов, обладающих гиротропными свойствами, и предназначенного для измерения спектра колебаний зеркально отражающих объектов. Показано, что такой интерферометр может работать, как в режиме линейной фазовой демодуляции, так и в режиме квадратичной фазовой демодуляции.

1 ВСТРЕЧНОЕ ДВУХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ГИРОТРОПНОМ КУБИЧЕСКОМ ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ СИММЕТРИИ 23

1.1 Модель взаимодействия

Для формирования фоторефрактивных голограмм и их использования в практических приложениях может быть использована пропускающая схема взаимодействия световых волн в фоторефрактивном кристалле [1-6, 14]. Это взаимодействие рассматривается в так называемой конфигурации пропускания, когда световая волна падает на две противоположные грани фоторефрактивного кристалла. Схема такого взаимодействия показана на рисунке 1.1.



I_S и I_R – интенсивность сигнального и опорного (рефрентного) световых пучков, соответственно.

Рисунок 1.1 – Схема встречного двухпучкового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле.

При моделировании взаимодействия вместо пучков, падающих на кристалл, будем рассматривать плоские световые волны с векторами электрической напряженности следующего вида

$$\tilde{E}_{Sin} = \frac{S_{in}}{2} e_S \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_S \cdot \mathbf{r})] + \text{к.с.}, \quad \tilde{E}_{Rin} = \frac{R_{in}}{2} e_R \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_R \cdot \mathbf{r})] + \text{к.с.} \quad (1.1)$$

где S_{in} и R_{in} – амплитуды волн;

e_S и e_R – векторы поляризации волн;

ω – частота;

k_S и k_R – волновые векторы;

$r = xx^0 + yy^0 + zz^0$ – радиус-вектор в системе координат с ортами x^0 , y^0 и z^0 (см. рис. 1.1);

$к.с.$ – означает комплексное сопряжение.

В общем случае фоторефрактивные кристаллы могут обладать двулучепреломлением [1, 3-6, 11, 12]. Поэтому в результате преломления на границе каждой из падающих волн, \tilde{E}_{Sin} и \tilde{E}_{Rin} , в кристалле будет распространяться соответствующая им пара волн следующего вида:

$$\tilde{E}_{S1} = \frac{S_1}{2} e_{S1} \exp[i(\omega t - k_{S1} \cdot r)] + к.с., \quad \tilde{E}_{S2} = \frac{S_2}{2} e_{S2} \exp[i(\omega t - k_{S2} \cdot r)] + к.с., \quad (1.2)$$

$$\tilde{E}_{R1} = \frac{R_1}{2} e_{R1} \exp[i(\omega t - k_{R1} \cdot r)] + к.с., \quad \tilde{E}_{R2} = \frac{R_2}{2} e_{R2} \exp[i(\omega t - k_{R2} \cdot r)] + к.с., \quad (1.3)$$

где $S_{1,2}$ и $R_{1,2}$ – амплитуды волн в кристалле;

$e_{S1,S2}$ и $e_{R1,R2}$ – векторы поляризации собственных оптических волн кристалла [6];

$k_{S1,S2}$ и $k_{R1,R2}$ – волновые векторы собственных оптических волн кристалла.

Векторная диаграмма встречного симметричного взаимодействия плоских световых волн представлена на рисунке 1.2. На этом рисунке $\theta_S, \theta_{S2}, \theta_{S1}$ – углы между волновыми векторами k_S, k_{S1}, k_{S2} и нормалью к входной грани Ox ; $\theta_R, \theta_{R1}, \theta_{R2}$, – углы между волновыми векторами k_R, k_{R1}, k_{R2} и нормалью к входной грани Ox . Общее световое поле в кристалле является суперпозицией всех распространяющихся в нем волн

$$\tilde{E} = \tilde{E}_{S1} + \tilde{E}_{S2} + \tilde{E}_{R1} + \tilde{E}_{R2} \quad (1.4)$$

Отметим, что для рассматриваемого случая справедливы следующие соотношения для волновых векторов собственных волн кристалла

$$k_{S1,2} = n_{1,2} k \cos \theta_{1,2} x^0 - n_{1,2} k \sin \theta_{1,2} z^0; \quad k_{R1,2} = -n_{1,2} k \cos \theta_{1,2} x^0 - n_{1,2} k \sin \theta_{1,2} z^0, \quad (1.5)$$

где

$$n_{1,2} = n \pm \rho/k, \quad (1.6)$$

собственные показатели преломления тиреотропного кристалла;

n – показатель преломления кристалла, невозмущенного за счет гидротерапии;

k – волновое число в вакууме;

ρ – удельное оптическое вращение плоскости поляризации ($\rho/k \ll n$).

Так как для встречного взаимодействия типичным является малость углов $\theta_{1,2} \ll 1$, то можно считать, $k_{S1,2} \cong n_{1,2} k x^0$; $k_{R1,2} \cong -n_{1,2} k x^0$, что соответствует параксиальному приближению. В этом приближении векторы поляризации собственных волн можно представить в форме:

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_{S1} = \mathbf{e}_{R1}^* = \frac{\mathbf{y}^0 + iz^0}{\sqrt{2}}, \quad \mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_{S2} = \mathbf{e}_{R2}^* = \frac{\mathbf{y}^0 - iz^0}{\sqrt{2}} \quad (1.7)$$

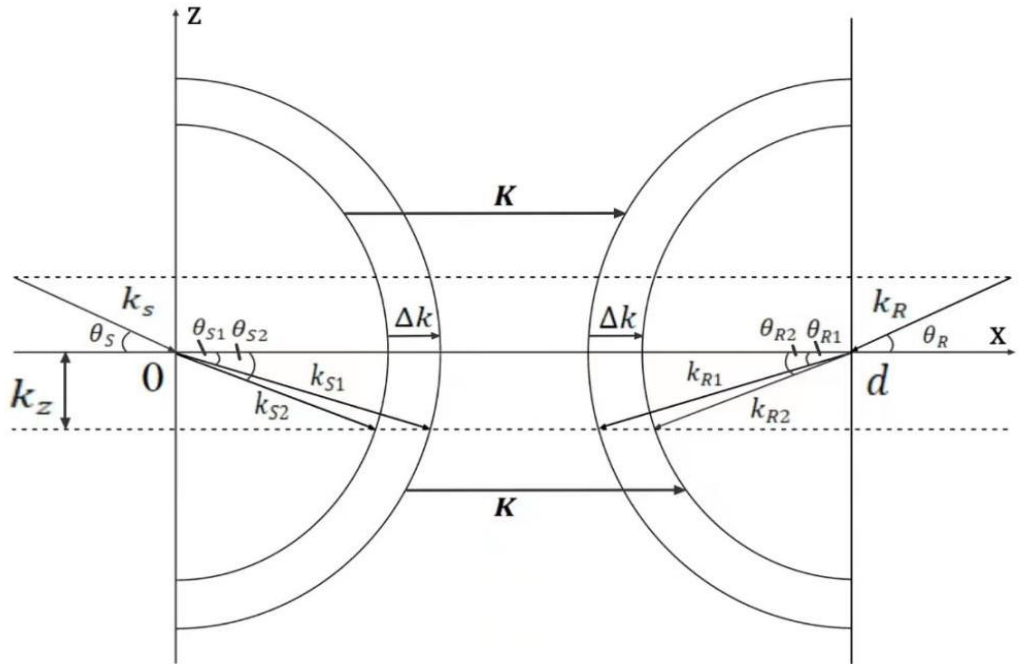


Рисунок 1.2 – Векторная диаграмма встречного двухволнового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле.

Интенсивность общего светового поля в кристалле $I = \tilde{\mathbf{E}} \cdot \tilde{\mathbf{E}}^*$ формирует интерференционную световую решетку, которую можно получить в следующем виде

$$I = I_0 \left[1 + \frac{m}{2} \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) + \frac{m^*}{2} \exp(-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \right], \quad (1.8)$$

где коэффициент модуляции m и вектор интерференционной решетки \mathbf{K} описываются соотношениями:

$$m = 2 \frac{S_1^* R_2 + S_2^* R_1}{I_0} \quad (1.9)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_{S1} - \mathbf{k}_{R2} = \mathbf{k}_{S2} - \mathbf{k}_{R1} \cong (n_1 + n_2) k x^o \approx 2n k x^o \quad (1.10)$$

$$\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_{S1} - \mathbf{k}_{S2} = \mathbf{k}_{R2} - \mathbf{k}_{R1} = \Delta k x^o \cong (n_1 - n_2) k x^o = 2\rho x^o \quad (1.11)$$

Под действием интерференционной световой решетки в кристалле за счет фотопроводимости формируется поле пространственного заряда $\mathbf{E}_{sc} \equiv \mathbf{E}_{sc}(I)$, которое приводит к возмущениям его диэлектрической проницаемости за счет линейного электрооптического эффекта Поккельса [1-6, 14]. Общая форма таких возмущений в кубическом фоторефрактивном кристалле может быть описана соотношением $\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = n^4 \boldsymbol{\varepsilon}_0 \mathbf{r}^{(3)} \cdot \mathbf{E}_{sc}(I)$, где n – показатель преломления невозмущенного кристалла; $\mathbf{r}^{(3)}$ – электрооптический тензор третьего ранга, $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ – фундаментальная диэлектрическая постоянная. Возмущения диэлектрической проницаемости оказывают обратное влияние на световое поле, вектор электрической напряженности которого должен удовлетворять следующему нелинейному уравнению Гельмгольца для гиротропных кристаллов [6]:

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{\mathbf{E}} - n^2 k^2 \tilde{\mathbf{E}} + 2\rho \nabla \times \tilde{\mathbf{E}} + \rho^2 \tilde{\mathbf{E}} = -n^4 k^2 \left(\mathbf{r}^{(3)} \cdot \mathbf{E}_{sc}(\tilde{\mathbf{E}} \cdot \tilde{\mathbf{E}}^*) \right) \cdot \tilde{\mathbf{E}} \quad (1.12)$$

где n – показатель преломления невозмущенного кристалла;

$\nabla = (\partial/\partial x)\mathbf{x}^o + (\partial/\partial y)\mathbf{y}^o + (\partial/\partial z)\mathbf{z}^o$ – векторный дифференциальный оператор.

Из уравнения (1.12) следует, что самосогласованная картина взаимодействия во многом определяется процессами формирования поля пространственного заряда, которые будут рассмотрены в следующем пункте.

1.2 Формирование поля пространственного заряда

Большое количество фоторефрактивных кристаллов является диэлектриками, например, LiNbO_3 , LiTaO_3 , BaTiO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и др. Их светопроводимость обусловлена наличием фотоактивных легированных центров. Авторами работ [16] предложили упрощенную модель монополярного проводящего кристалла, который учитывает влияние истощения фотоактивных центров и насыщения ловушек на формирование преломляющих голограмм. Зонная энергетическая диаграмма такого кристалла представлена на рисунке 1.3. Данная модель характеризуется наличием одного типа фотоактивного кристалла-донора и одного типа компенсационного приемника. На зонной диаграмме есть все тип соответствует свой уровень энергии. Роль ловушек здесь играют ионизированные доноры. Эту модель часто называют одноуровневой моделью, поскольку она имеет только один фотоактивный уровень в полосе. В рамках такой модели пространственное разделение электрического заряда можно разбить на следующие элементарные процессы: возбуждение квантом света $\hbar\omega$ электрона с донорного уровня в зону проводимости, его перемещение под действием диффузии и дрейфа во внешнем (\mathbf{E}_0) и наведенном внутреннем (\mathbf{E}_{sc}) электрическом поле с последующей рекомбинацией на ионизированный донор. Это гарантирует, что электроотрицательность образца. Отметим, что концентрация акцепторов N_A в этой модели должна быть меньше общей концентрации доноров N_D ($N_A < N_D$).

Уравнение, описывающее формирование светоиндуцированного пространственного заряда в кристаллах в рамках одноуровневой модели, можно представить следующим образом [6]:

$$\nabla \cdot \left[\varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_{sc}}{\partial t} + e \mu n \mathbf{E}_{sc} + k_B T' \mu \nabla n \right] = 0 \quad (1.13)$$

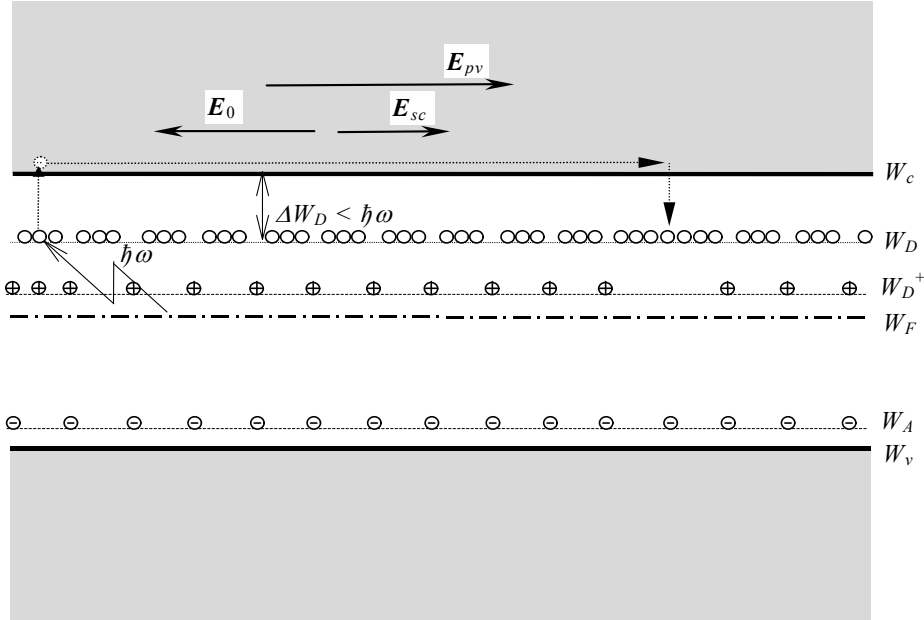
$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}_{sc}) = \frac{e}{\varepsilon_0} (N_D^+ - n - N_A) \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial N_D^+}{\partial t} = (s_D I + \beta_d) (N_D - N_D^+) - \gamma_D N_D^+ n \quad (1.15)$$

где N_D^+ – концентрация ионизированных доноров;

s_D и γ_D – сечение фотоионизации доноров и коэффициент рекомбинации электрона на ионизированный донор соответственно;

β_d – коэффициент термического возбуждения доноров, который связан со скоростью темновой генерации при помощи соотношения $g_d = \beta_d N_D$.



W_c , W_v и W_F – энергия дна зоны проводимости, потолка валентной зоны и энергия Ферми соответственно

Рисунок 1.3 – Зонная структура фоторефрактивного кристалла с одним фотоактивным донорным уровнем (W_D и W_D^+ – энергия неионизированных и ионизированных доноров соответственно) и одним уровнем компенсирующих акцепторов (W_A).

Общее решение системы уравнений (1.13)–(1.15) не известно. Для получения приближенного решения этой системы будем искать неизвестные E_{sc} , N_D^+ , n в виде:

$$E_{sc} = \left[\frac{E_1(t, x)}{2} \exp(iKx) + \frac{E_1^*(t, x)}{2} \exp(-iKx) \right] x^0 = E_{sc}(t, x) x^0 \quad (1.16)$$

$$N_D^+ = N_0(t) + \frac{N_1(t, x)}{2} \exp(iKx) + \frac{N_1^*(t, x)}{2} \exp(-iKx) \quad (1.17)$$

$$n = n_0(t) + \frac{n_1(t, x)}{2} \exp(iKx) + \frac{n_1^*(t, x)}{2} \exp(-iKx) \quad (1.18)$$

где учтено, что $K=Kx^0$ (см. рисунок 1.2). Отметим, что изменения амплитуд $E_1(t,x)$, $N_1(t,x)$ и $n_1(t,x)$ вдоль x -оси на периоде решетки $\Lambda=2\pi/K$ пренебрежимо малы.

Прямая подстановка (1.16)-(1.18) в уравнения (1.13)-(1.15) с учетом неравенств $m < 1$, $n_0(t) \ll n_1(t,x)$ и $N_0(t) \ll N_1(t,x)$ позволяет получить следующее линеаризованное кинетическое уравнение относительно амплитуды первой пространственной гармоники наведенного поля:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 E_1}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau_{di}(t)} + \frac{1}{\tau_{dif}} + \frac{1}{\tau_I} + \frac{1}{\tau_R} + 2\gamma_D n_0(t) \right) \frac{dE_1}{dt} + \\ & + \left[\frac{1}{\tau_{di}(t)\tau_I} + \frac{1}{\tau_R\tau_{di}(t)} + \frac{1}{\tau_I\tau_{dif}} + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\tau_{di}(t)} \right) + \frac{\gamma_D n_0(t)}{\tau_{dif}} + 2 \frac{\gamma_D n_0(t)}{\tau_{di}(t)} \right] E_1 = \\ & = -im(t,x) \frac{e\mu}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{E_{dif}}{\tau_I} (N_D - N_A - n_0(t)) \end{aligned} \quad (1.19)$$

где

$$\tau_{dif} = \frac{e}{\mu K^2 k_B T_K}, \quad \tau_I = \frac{1}{S_D I_0}, \quad \tau_R = \frac{1}{\gamma_D N_A}, \quad \tau_{di}(t) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{e\mu n_0(t)}, \quad E_{dif} = \frac{k_B T_K K}{e} \quad (1.20)$$

Решение относительно временной зависимости однородной составляющей концентрации электронов $n_0(t)$ может быть найдено в виде

$$n_0(t) = \frac{n_x \cdot \exp(-\Delta t)(n_{00} - n_{st}) - n_{st}(n_{00} - n_x)}{\exp(-\Delta t)(n_{00} - n_{st}) - (n_{00} - n_x)} \quad (1.21)$$

где

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_R} - \frac{1}{\tau_I} \right)^2 + \frac{4}{\tau_D \tau_I}} \quad (1.22)$$

$$n_{st} = \frac{\sqrt{\tau_R^2 + \tau_I^2 + 2\tau_R\tau_I - 4N_A\tau_R^2\tau_I\gamma_D + 4N_D\tau_R^2\tau_I\gamma_D} - \tau_R - \tau_I}{2\tau_R\tau_I\gamma_D} \quad (1.23)$$

$$n_x = -\frac{\sqrt{\tau_R^2 + \tau_I^2 + 2\tau_R\tau_I - 4N_A\tau_R^2\tau_I\gamma_D + 4N_D\tau_R^2\tau_I\gamma_D} + \tau_R + \tau_I}{2\tau_R\tau_I\gamma_D} \quad (1.24)$$

Из уравнения (1.19) следует, что амплитуда поля пространственного заряда является мнимой величиной ($\text{Re}(E_1(t))=0$). Зависимость $n_0(t)$, рассчитанная по формулам (1.20)-(1.23), и зависимость $-\text{Im}(E_1(t))$, полученная

численным интегрированием в системе Mathcad, представлены на рисунке 1.4а и 1.4б, соответственно. В расчетах использовались следующие параметры: $N_A=10^{20} \text{ м}^{-3}$, $N_D=10^{25} \text{ м}^{-3}$, $\mu=10^{-5} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $s_D=2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Дж}$, $I_0=10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $\mu \tau_R=10^{-10} \text{ м}^2/\text{В}$. Считалось, что период решетки пространственного заряда, связанный с величиной вектора решетки соотношением, $K=2 \pi / \Lambda$, равен $\Lambda=0.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Из сравнения кривых на рисунках а и б видно, что время выхода на стационарное значение n_{st} концентрации однородной части электронов в зоне проводимости $n_0(t)$ значительно меньше, чем время выхода на стационарное значение амплитуды поля пространственного заряда E_1 . Поэтому при анализе кинетики амплитуды E_1 на основе решения уравнения (1.19) можно пренебречь зависимостью от времени концентрации $n_0(t)$, считая $n_0(t) \equiv n_{st}$.

Пренебрежение временной зависимостью однородной части электронов $n_0(t)$ влечет за собой и пренебрежение временной зависимостью амплитуду неоднородной части электронов ($\partial n_1 / \partial t = 0$). В этом приближении уравнение для амплитуды поля пространственного заряда может быть представлено в известном виде (см., например, [1-6]):

$$\frac{dE_1(t, x)}{dt} + \Gamma E_1(t, x) = -im(t, x)F, \quad (1.25)$$

где

$$\Gamma = \frac{I_0 N_D s_D}{N_A}, \quad (1.26)$$

$$F = \frac{E_{dif} I_0 N_D \mu e s_D \tau_{dif}}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}, \quad (1.27)$$

Из уравнения (1.25) следует, что кинетика амплитуды E_1 может изменяться в зависимости от пространственной координаты x , вследствие зависимости от пространственных координат коэффициента модуляции m интерференционной световой решетки (см. (1.8) и (1.9)). Поэтому для описания полной пространственно-временной динамики необходимо получить уравнение относительно пространственной зависимости коэффициента модуляции.

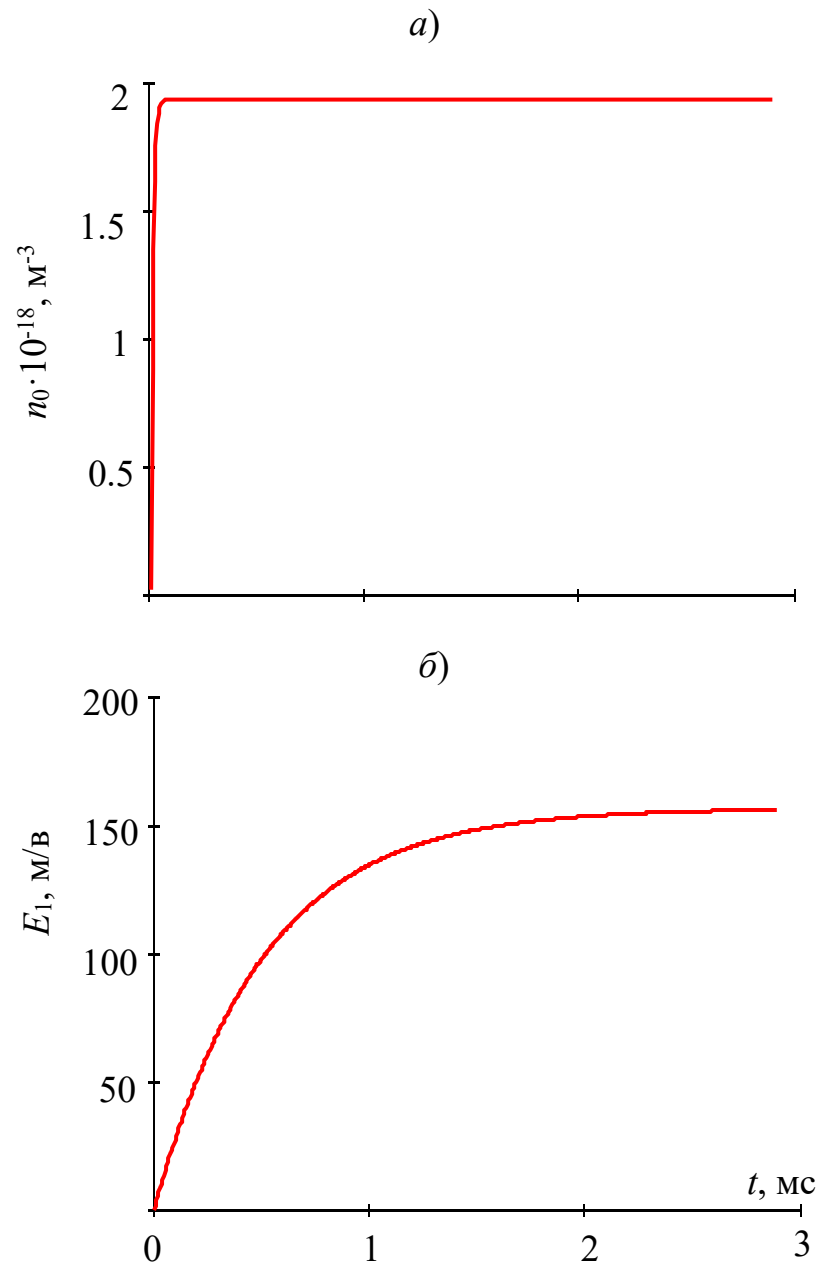


Рисунок 1.4 – Зависимость от времени однородной части концентрации электронов (а) и амплитуды поля пространственного заряда (б).

1.3 Уравнения связанных волн

Так как коэффициент m выражается через комплексные скалярные амплитуды волн в кристалле (см. (1.9)), то необходимо редуцировать уравнение Гельмгольца (1.12) к уравнениям относительно этих амплитуд. Используя соотношения (1.2)-(1.4), представим световое поле в кристалле в параксиальном приближении (см. (1.10)) в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{E}} = & \left[\frac{S_1(x)}{2} \mathbf{e}_1 \exp(-in_1 kx) + \frac{S_2(x)}{2} \mathbf{e}_2 \exp(-in_2 kx) + \right. \\ & \left. + \frac{R_1(x)}{2} \mathbf{e}_1^* \exp(in_1 kx) + \frac{R_2(x)}{2} \mathbf{e}_2^* \exp(in_2 kx) \right] \exp(i\omega t) + \text{к.с.} \end{aligned} \quad (1.28)$$

Подстановка соотношения (1.28) в уравнение Гельмгольца (1.12) и использование методики метода медленно-меняющихся амплитуд [***] позволяет получить следующие связанные уравнения относительно амплитуд взаимодействующих волн:

$$\frac{\partial S_1}{\partial x} = -i \frac{\pi n^3 r_{41} E_1^*}{2\lambda} [g_I^* R_1 \exp(i\Delta kx) + g_E R_2], \quad (1.29)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial x} = -i \frac{\pi n^3 r_{41} E_1^*}{2\lambda} [g_E R_1 + g_I R_2 \exp(-i\Delta kx)], \quad (1.30)$$

$$\frac{\partial R_1}{\partial x} = i \frac{\pi n^3 r_{41} E_1}{2\lambda} [g_I \exp(-i\Delta kx) S_1 + g_E S_2], \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial R_2}{\partial x} = i \frac{\pi n^3 r_{41} E_1}{2\lambda} [g_E S_1 + g_I^* \exp(i\Delta kx) S_2], \quad (1.32)$$

где $g_E = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_1^* = \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_2^*$; $g_I = \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_2^*$, λ – длина световой волны в вакууме;

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 & x_3^0 & x_2^0 \\ x_3^0 & 0 & x_1^0 \\ x_2^0 & x_1^0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.33)$$

Система уравнений связанных волн (1.29)-(1.32) совместно с уравнением (1.25) и соотношением (1.9) формирует нелинейную модель самодифракции световых волн

на встречной фоторефрактивной решетке в кубическом гиротропном кристалле симметрии 23. Точное решение этой системы до сих пор не найдено.

Таким образом, за счет линейного электрооптического эффекта поле пространственного заряда \mathbf{E}_{sc} наводит неоднородные возмущения диэлектрической проницаемости, которые оказывают обратное влияние на световое поле. Эти процессы могут быть описаны самосогласованной системой нелинейных дифференциальных уравнений, включающей в себя материальные уравнения для поля \mathbf{E}_{sc} , концентраций свободных носителей, фотоактивных

примесных центров и ловушек, а также волновое уравнение для электрической напряженности \tilde{E} светового поля.

В разделе рассмотрена модель фоторефрактивного эффекта в кубическом гиротропом фоторефрактивном кристалле симметрии 23. При численных расчетах использовались параметры кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$. Показано, что в случае встречного взаимодействия исходная модель может редуцирована к системе нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных относительно амплитуд собственных оптических волн кристалла и амплитуды первой пространственной гармоники поля пространственного заряда. Эта модель описывает зависимость амплитуд собственных волн кристалла и амплитуды поля пространственного заряда от времени и от пространственной координаты вдоль вектора отражательной голографической решетки.

Показано, что кинетика взаимодействия в первую очередь определяется полем пространственного заряда. Формирование этого поля связано с фотогенерацией электронов с донорных энергетических уровней, их движением под действием диффузии и дрейфа, и последующей рекомбинацией на акцепторные уровни (уровни ловушек). При этом время выхода на установившейся режим фотоэлектронов на порядок меньше, чем время выхода на аналогичный режим поля пространственного заряда.

2 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПРИБЛИЖЕНИИ НЕИСТОЩИМОЙ НАКАЧКИ

2.1 Общее решение уравнений относительно коэффициента модуляции и амплитуды поля пространственного заряда

Рассмотрим случай, когда сигнальная волна является слабой, а опорная волна является сильной (см. рисунок 1.1 и 1.2). При этом справедливы неравенства $R_{1,2} \gg S_{1,2}$ и можно считать, что $R_1 = const$ и $R_2 = const$. В этом, так называемом приближении неистошмой накачки [1-6, 11, 12 14], уравнения (1.31) и (1.32) теряют смысл. Тогда, умножая уравнение, комплексно сопряженное к уравнению (1.28) на $2R_2/I_0$, а уравнение, комплексно сопряженное к уравнению (1.29) на $2R_1/I_0$ и затем складывая их, можно получить следующее уравнение относительно коэффициента модуляции интерференционной картины в кристалле (см. (1.9)):

$$\frac{\partial m(t, x)}{\partial x} = ik \frac{n^3 r_{41}}{2I_0} E_1(t, x) \left\{ g_E (|R_1|^2 + |R_2|^2) + 2 \operatorname{Re} (g_I R_1 R_2^* \exp(i\Delta kx)) \right\}, \quad (2.1)$$

которое совместно с уравнением (1.25) описывает пространственно-временную трансформацию величин $m(x, t)$ и $E_1(x, t)$.

Для решения уравнений (1.9) и (1.25) используем преобразование Лапласа (\hat{L}) [17, 18] по временной переменной « t ». Изображение этих уравнений в комплексном пространстве можно получить в следующем виде:

$$\frac{d\tilde{m}(p, x)}{dx} = ik \frac{n^3 r_{41}}{2I_0} \left\{ g_E (|R_1|^2 + |R_2|^2) + 2 \operatorname{Re} (g_I R_1 R_2^* \exp(i\Delta kx)) \right\} \tilde{E}_1(p, x), \quad (2.2)$$

$$\tilde{m}(p, x) = i \frac{p + \Gamma}{F} \tilde{E}_1(p, x), \quad (2.3)$$

где учтено, что в начальное распределение амплитуды поля пространственного заряда тождественно равно нулю $E_1(0, x) \equiv 0$; $\tilde{m}(p, x) = \hat{L}[m(t, x)]$; $\tilde{E}_1(p, x) = \hat{L}[E_1(t, x)]$; p – комплексная переменная в пространстве изображений, соответствующая вещественной переменной « t » в пространстве оригиналов. Для упрощения записей введем обозначения

$$v_r = \frac{2}{kn^3 r_{41}}, \quad \eta(x) = g_E (|R_1|^2 + |R_2|^2) + 2 \operatorname{Re} (g_I R_1 R_2^* \exp(i\Delta kx)). \quad (2.4)$$

Исключая из уравнений (2.2) и (2.3) изображение коэффициента модуляции получим следующее обыкновенное дифференциальное уравнение по переменной « x » относительно изображения амплитуды поля пространственного заряда

$$\frac{d\tilde{E}_1(p, x)}{dx} = \frac{F}{p + \Gamma} \frac{\eta(x)}{v_r} \tilde{E}_1(p, x), \quad (2.5)$$

решение, которого, используя справочник [19], можно получить в виде:

$$\tilde{E}(p, x) = \tilde{E}(p, 0) \exp\left[\frac{F}{p + \Gamma} \frac{h(x)x}{v_r}\right], \quad (2.6)$$

где

$$h(x)x = \int_0^x \eta(x') dx' = \frac{1}{I_0} \left\{ g_E (|R_1|^2 + |R_2|^2) - 2 \operatorname{Im} \left[g_I R_1 R_2^* \frac{1 - \exp(i\Delta kx)}{\Delta kx} \right] \right\} x, \quad (2.7)$$

$\tilde{E}_1(p, 0)$ есть изображение амплитуды $E_1(t, 0) = \hat{L}^{-1}[\tilde{E}_1(p, 0)]$ (\hat{L}^{-1} – обратное преобразование Лапласа) на входной грани кристалла (при $x=0$, см. рисунок 1 и 2).

Применяя обратное преобразование Лапласа к уравнению (2.6) можно получить следующий оригинал амплитуды поля пространственного заряда:

$$E_1(t, x) = E_1(t, 0) - \int_0^t E_1(\tau, 0) \exp[-\Gamma(t - \tau)] \sqrt{\frac{Fh(x)x}{v_r(t - \tau)}} J_1\left(2\sqrt{\frac{Fh(x)x}{v_r}(t - \tau)}\right) d\tau, \quad (2.8)$$

где $J_1(x)$ – функция Бесселя 1-го порядка [17, 19].

В формулу (2.8) входит временная зависимость амплитуды поля пространственного заряда на входной грани кристалла (при $x=0$), $E_1(t, 0)$. Эта зависимость может быть найдена из уравнения (1.9), так как коэффициент модуляции при $x=0$ ($m(t, 0)$) можно считать известным, так как он задается амплитудами падающего сигнального пучка и пучка накачки. Решение этого уравнения может быть записано в форме [19]:

$$E_1(t, 0) = -iF \exp(-\Gamma t) \int_0^t m(\tau, 0) \exp[\Gamma\tau] d\tau, \quad (2.9)$$

Последняя формула описывает общее решение (1.9) и (1.25) относительно амплитуды поля пространственного заряда. При известном

решении относительно амплитуды $E_1(t, 0)$ следующее решение относительно коэффициента модуляции может быть получено из уравнения (2.1) посредством простого интегрирования его правой части:

$$m(t, x) = m(t, 0) + \int_0^x i \frac{\eta(\xi)}{v_r} E_1(\xi, t) d\xi, \quad (2.10)$$

В рамках приближения неистоцимой волны накачки формулы (2.4) и (2.7)-(2.10) описывают общее аналитическое решение системы уравнений в частных производных (1.9) и (1.25) относительно амплитуды поля пространственного заряда и коэффициента модуляции интерференционной световой картины в при встречном взаимодействии в кубическом гиротропном фоторефрактивном кристалле симметрии 23.

2.2 Пространственно-временная трансформация амплитуды поля пространственного заряда при фазовой синусоидальной модуляции слабой сигнальной волны

Рассмотри случай когда скалярная амплитуда сигнальной волны (см. рисунок 1.1 и 1.2) имеет фазовую синусоидальную модуляцию во времени $S_{in} = S_{in}^{st} \exp[-i\varphi_m \sin\Omega t]$, где φ_m и Ω есть амплитуда и частота модуляции, соответственно, S_m^{st} амплитуда волны в отсутствии модуляции ($\varphi_m=0$). После преломления скалярные амплитуды собственных волн и, как следствие, контраст m на границе $x=0$ будут иметь такую же модуляцию фазы

$$S_{1,2} = S_{1,2}^{st} \exp(-i\varphi_m \sin\Omega t), \quad m(t, 0) = m_{st} \exp(i\varphi_m \sin\Omega t), \quad (2.11)$$

где $S_{1,2}^{st}$ и m_{st} скалярные амплитуды собственных волн и контраст в отсутствии фазовой модуляции. В этом случае формула (2.9) для амплитуды поля пространственного заряда на входной грани кристалла (при $x=0$) принимает вид

$$\begin{aligned} E_1(t, 0) &= -iF \exp(-\Gamma t) \int_0^t m_{st} \sum_{j=-\infty}^{\infty} J_j(\varphi_m) \exp[(ij\Omega + \Gamma)\tau] d\tau = \\ &= -iF m_{st} \sum_{j=-\infty}^{\infty} J_j(\varphi_m) \frac{\exp(ij\Omega t) - \exp(-\Gamma t)}{ij\Omega + \Gamma} \end{aligned}, \quad (2.12)$$

где использовано разложение экспоненты $\exp(i\varphi_m \sin \Omega t)$ в ряд по функциям Бесселя целого порядка [17, 18].

Редукция формулы (2.8) с учетом соотношения (2.12) позволяет представить пространственно-временную зависимость амплитуды наведенного в кристалле электрического поля в форме:

$$E_1(t, x) = -im_{st} F \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{J_j(\varphi_m)}{(ij\Omega + \Gamma)} [\exp(ij\Omega t) - \exp(-\Gamma t)] - \exp(-\Gamma t) \times \right. \\ \left. \times \frac{J_j(\varphi_m)}{(ij\Omega + \Gamma)} \int_0^t [\exp[(ij\Omega + \Gamma)\tau] - 1] \sqrt{\frac{Fh(x)x}{v_r(t-\tau)}} J_1 \left(2 \sqrt{\frac{Fh(x)x}{v_r}(t-\tau)} \right) d\tau \right\}, \quad (2.13)$$

На рисунке 2.1 представлены временные зависимости амплитуды поля пространственного заряда $E_1(t, x)$, сформированного на длине световой волны $\lambda=0.633$ мкм в различных сечениях кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ при ориентации вектора фоторефрактивной решетки \mathbf{K} вдоль кристаллофизической оси $[111]$ и одинаковой линейной поляризации падающих на кристалл световых волн вдоль оси $[1\bar{1}0]$. Кривые 1 рассчитаны для $x=0$ м; 2– $x=1$ см; 3– $x=5 \times 10^{-3}$ м; 4– $x=10^{-2}$ м. При расчетах амплитуда и частота модуляции принимались равными $\varphi_m=36^\circ$ и $\Omega=50$ Гц, соответственно, и использовались следующие типичные параметры кристалла [***]: $\Lambda=2\pi/K=1.22 \cdot 10^{-7}$ м, $r_{41}=-5 \cdot 10^{-12}$ м/В, $n=2.58$, $\rho=6 \cdot 10^3$ град/мм. Линейная поляризация падающих на кристалл волн задавалась углом θ относительно оси $[1\bar{1}0]$ кристалла. Для рассматриваемого случая $\theta=0^\circ$

Из рисунок 2.1 видно, что амплитуда $E_1(t, x)$ выходит на установившийся периодический режим зависимости от времени по истечении времени $t_{st}=200\tau_{di}=3$ мс ($\tau_{di} \approx 0.15$ мс), которое значительно больше обратной постоянной $\Gamma^{-1} \approx 5$ мс ($t_{st} \gg \Gamma^{-1}$). Для этого режима ($t > t_{st}$) формулы (2.13) упрощается к следующему приближенному виду:

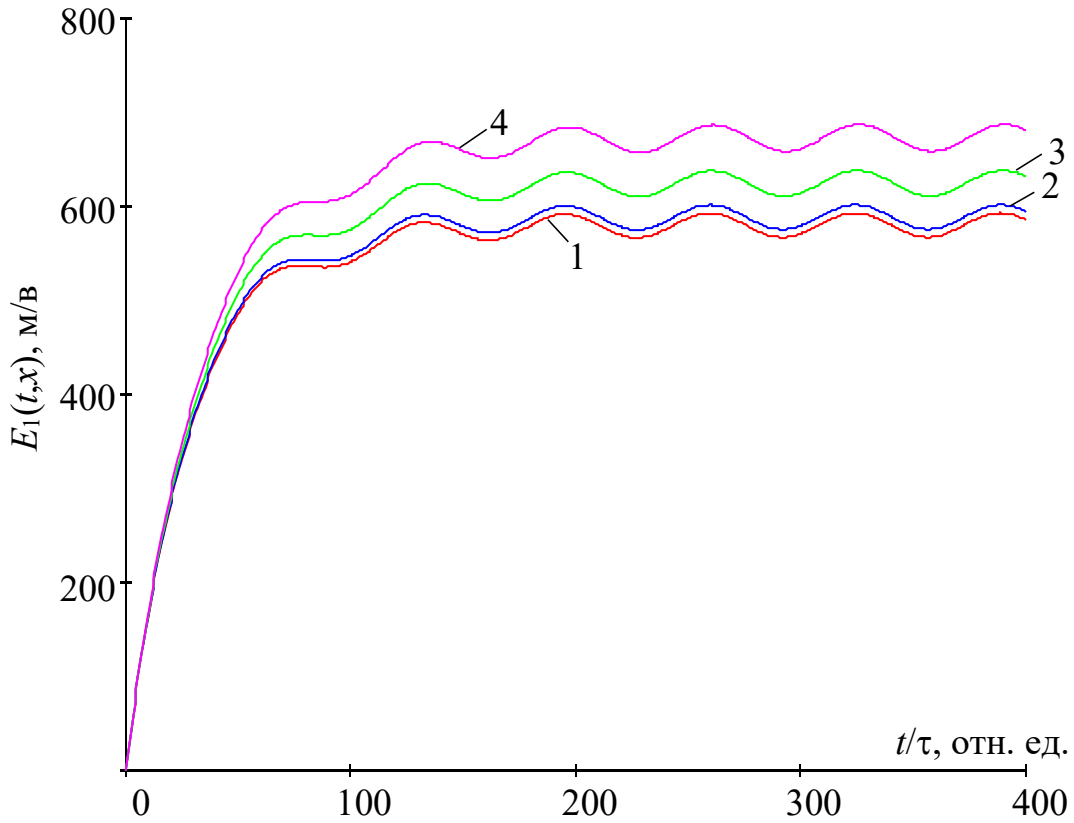


Рисунок – 2.1. Кинетика амплитуды поля пространственного заряда в различных сечениях кристалла $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}$ при ориентации вектора фоторефрактивной решетки \mathbf{K} вдоль кристаллофизической оси $[111]$ и линейной поляризации падающих на кристалл световых волн вдоль оси $[1\bar{1}0]$. Время диэлектрической релаксации равно $\tau_{\text{di}}=0.15$ мс. Кривые 1 рассчитаны для $x=0$ м; 2– $x=10^{-3}$ м; 3– $x=5 \times 10^{-3}$ м; 4– $x=10^{-2}$ м.

$$E_1(t > t_{st}, x) \approx E_{1st}(t, x) = -im_{st} E_{st} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_j(\varphi_m)}{1 + i(j\Omega/\Gamma)} \exp(ij\Omega t) \right] \exp\left[\frac{G}{2} h(x)x \right]. \quad (2.14)$$

Численный анализ показал, что для амплитуд синусоидальной фазовой модуляции $\varphi_m < 45^\circ$ основной вклад в сумму в формуле (2.14) дают функции Бесселя нулевого, первого и второго порядков. Поэтому ее, в свою очередь, тоже можно представить в виде приближенного соотношения:

$$E_{1st}(t, x) = -im_{st} E_{st} \left[J_0(\varphi_m) + \frac{2i\Gamma}{\sqrt{\Gamma^2 + \Omega^2}} J_1(\varphi_m) \sin(\Omega t - \varphi_1) + \right. \\ \left. + \frac{2\Gamma}{\sqrt{\Gamma^2 + 4\Omega^2}} J_2(\varphi_m) \cos(2\Omega t - \varphi_2) \right] \exp\left[\frac{G}{2} h(x)x \right]. \quad (2.15)$$

где $E_{st} = F/\Gamma$; В/м

$\varphi_1 = \text{atan}(\Omega/\Gamma)$; рад.

$\varphi_2 = \text{atan}(2\Omega/\Gamma)$; рад.

$G = 2\pi n^3 r_{41} E_{st} / \lambda$. м⁻¹

2.3 Интенсивность слабой сигнальной волны при начальной синусоидальной фазовой модуляции в установившемся периодическом режиме

В рамках приближения неистоцимой накачки уравнения связанных волн (1.29) и (1.30) для установившегося режима, $t \gg \Gamma^{-1}$ (см. (2.14)) можно представить в следующей форме:

$$\frac{\partial S_2}{\partial x} = -\frac{\pi n^3 r_{41}}{2\lambda} E_{st} m_{st}^* \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_j(\varphi_m)}{1-i(j\Omega/\Gamma)} \exp(-ij\Omega t) \right] \exp\left[\frac{G}{2} h(x)x\right] \times \quad (2.16)$$

$$\times \left[g_I R_1^* \exp(-i\Delta k x) + g_E^* R_2^* \right]$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial x} = -\frac{\pi n^3 r_{41}}{2\lambda} E_{st} m_{st}^* \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_j(\varphi_m)}{1-i(j\Omega/\Gamma)} \exp(-ij\Omega t) \right] \exp\left[\frac{G}{2} h(x)x\right] \times \quad (2.17)$$

$$\times \left[g_E^* R_1^* + g_I R_2^* \exp(i\Delta k x) \right]$$

Прямое интегрирование последних уравнений позволяет получить решение относительно амплитуд слабого сигнального светового поля в следующем вид

$$S_1(t, x) = S_{10}(t) + \frac{G}{4} m_{st} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_j(\varphi_m)}{1-i(j\Omega/\Gamma)} \exp(-ij\Omega t) \right] \times \quad (2.18)$$

$$\times \int_0^x \exp\left(\frac{G}{2} h(\zeta)\zeta\right) \left[\overline{g_I} R_1 \exp(i\Delta k \zeta) + g_E R_2 \right] d\zeta$$

$$S_2(t, x) = S_{20}(t) + \frac{G}{4} m_{st} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_j(\varphi_m)}{1-i(j\Omega/\Gamma)} \exp(-ij\Omega t) \right] \times \quad (2.19)$$

$$\times \int_0^x \exp\left(\frac{G}{2} h(\zeta)\zeta\right) \left[g_E R_1 + g_I R_2 \exp(-i\Delta k \zeta) \right] d\zeta$$

где

$$S_{10}(t) = S_{1st} \sum_{j=-\infty}^{\infty} [J_j(\varphi_m) \exp(ij\Omega t)]. \quad (2.20)$$

$$S_{20}(t) = S_{2st} \sum_{j=-\infty}^{\infty} [J_j(\varphi_m) \exp(ij\Omega t)]. \quad (2.21)$$

$S_{1st, 2st}$ – амплитуды слабого сигнального светового поля на границе $x=0$ в начальный момент времени (в момент включения засветки кристалла)

При этом интенсивность слабой сигнальной волны может быть рассчитана по формуле:

$$I_S(t, x) = \left[\left(|S_1(t, x)| \right)^2 + \left(|S_2(t, x)| \right)^2 \right]. \quad (2.22)$$

Граничные значения амплитуд слабого сигнального светового поля и сильного светового поля волны накачки могут быть рассчитаны по соотношениям из работ [6, 11, 12], которые можно переписать в форме.

$$S_{1st, 2st} = S \left(\vec{e}_{1,2}^* \cdot \vec{e}_S \right). \quad (2.23)$$

$$R_{1,2} = R \left(\vec{e}_{1,2} \cdot \vec{e}_R \right). \quad (2.24)$$

На рисунке 2.2 представлены зависимости интенсивности I_S от времени на различных расстояниях x от входной грани кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ в установившемся режиме. При расчете кривых на этом рисунке использовались те же условия и параметры, что и при расчете кривых на предыдущем рис. 2.1. Из рисунка следует, что в установившемся режиме интенсивность слабой сигнальной волны имеет периодическую временную модуляцию.

Из найденных решений (2.18) и (2.19) следует, что амплитуда временных колебаний интенсивности слабой сигнальной волны I_S зависит от амплитуды φ_m синусоидальной временной модуляции фазы сигнальной волны, падающей на фоторефрактивный кристалл.

На рисунке 2.3 представлены зависимости амплитуды колебаний интенсивности I_S амплитуды φ_m на различных расстояниях x от входной грани кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ в установившемся режиме. Как следует из рисунка, амплитудная характеристика фазовой демодуляции имеет две характерные

области. Первая область – это область однозначной связи между амплитудой I_S и амплитудой φ_m . Она ограничена амплитудой $\varphi_m < 70^\circ$.

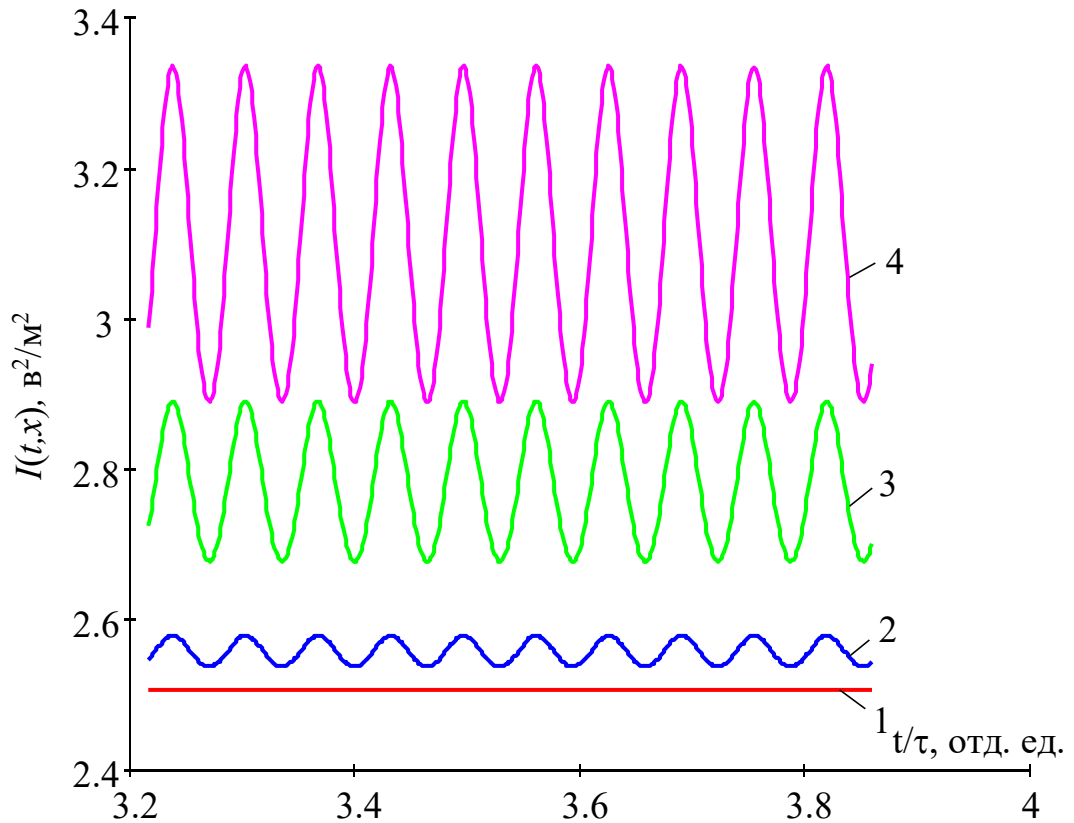


Рисунок – 2.2. Зависимость интенсивности I_S от времени на различных расстояниях x от входной грани кристалла $\text{Вi}_{12}\text{ТiO}_{20}$ в установившемся режиме.

Кривые 1 рассчитаны для $x=0$ м; 2– $x=10^{-3}$ м; 3– $x=5 \times 10^{-3}$ м; 4– $x=10^{-2}$ м.

Это область может быть использована для фазовой демодуляции и разработки лазерного интерферометра измеряющего амплитуду колебаний вибрирующего объекта и подстраивающегося под амплитуду фазовой модуляции (адаптивные детекторы). Во второй области $\varphi_m > 70^\circ$ одна и та же амплитуда колебаний I_S может достигаться при двух значениях амплитуды φ_m . Однозначная связь между этими амплитудами здесь нарушена. Эта область может быть использована для создания оптически бистабильных устройств.

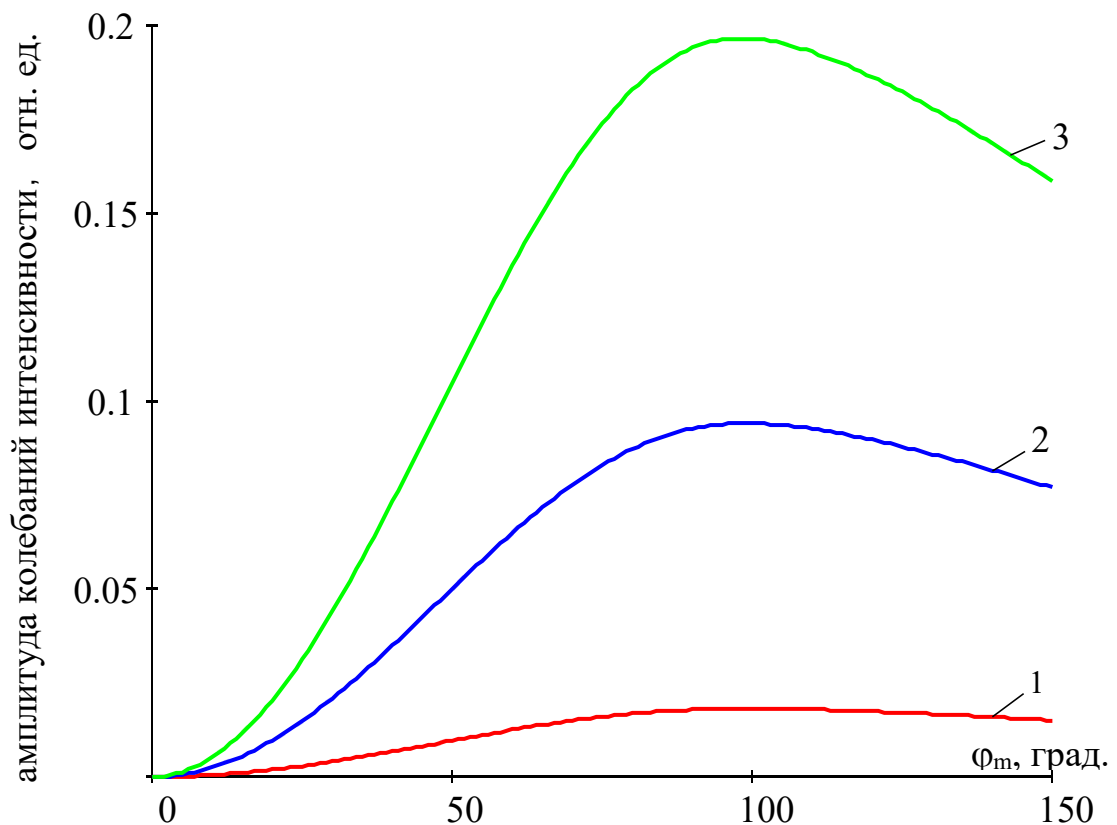


Рисунок – 2.3. Зависимость величины I_s флуктуации интенсивности Φ_m на различных расстояниях x от входной поверхности для кристаллов $\text{Вi}_{12}\text{ТiO}_{20}$ в установившемся режиме. Кривые 1 рассчитаны для $x=10^{-3}$ м; 2– $x=5 \times 10^{-3}$ м; 4– $x=10^{-2}$ м.

Таким образом, в разделе выполнен анализ встречного взаимодействия слабой сигнальной волны, имеющей фазовую синусоидальную модуляцию, с сильной волной накачки. В приближении неистощимой накачки получены уравнения связанных волн и найдено их точное аналитическое решение. Численное моделирование выполнено для случая взаимодействия в кристалле $\text{Вi}_{12}\text{ТiO}_{20}$.

Показано, что фазовая синусоидальную модуляция слабой сигнальной волны, падающей на фоторефрактивный кристалл, преобразуется во временную модуляцию интенсивности этой волны на выходе из кристалла после взаимодействия в нем с сильной волной накачки. При этом амплитуда колебаний интенсивности волны, прошедшей кристалл, однозначно связана с амплитудой фазовой модуляции волны, падающей на кристалл. Такое преобразование аналогично фазовому детектированию в радиотехнических

системах и может быть использовано для создания адаптивных интерферометров различного назначения.

3 АДАПТИВНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО КРИСТАЛЛА ТИТАНАТА ВИСМУТА

3.1 Принципы работы адаптивного фоторефрактивного коррелятора и интерферометра

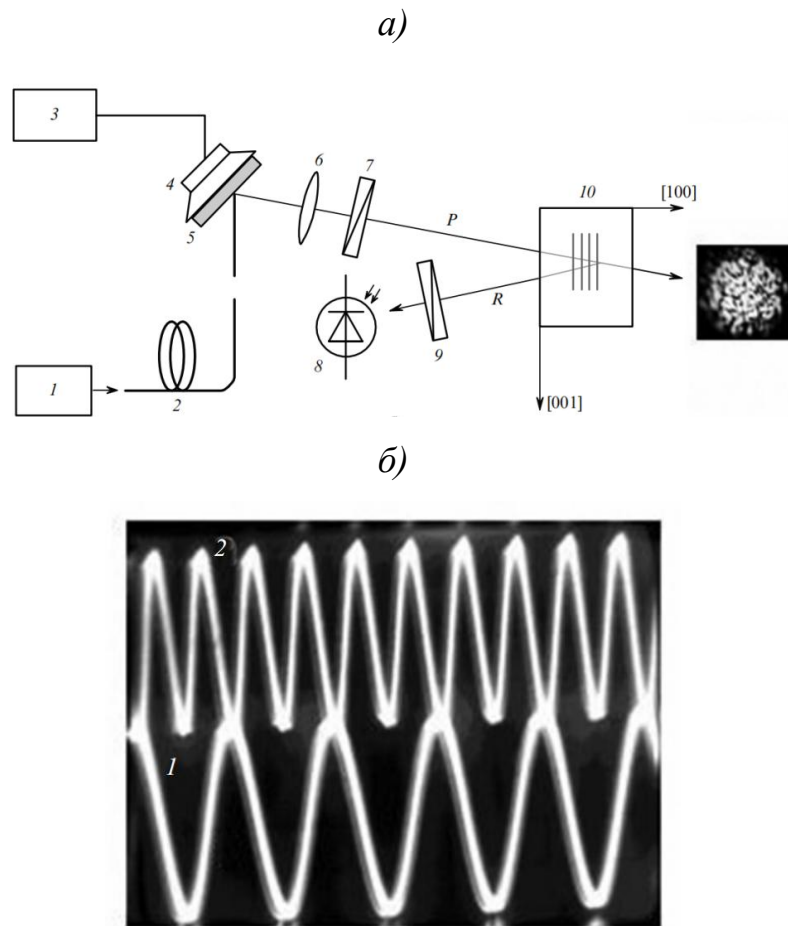
Измерительные системы на основе оптических интерферометров обладают преимуществом высокой чувствительности и подходят для дистанционного контроля механических колебаний. Однако в процессе использования слишком высокая чувствительность сделает измерительную систему уязвимой к влиянию окружающей среды: температура, вибрация, механическое напряжение, давление и т. д. будут влиять на результаты измерений. Смещение двух волн в фоторефрактивном кристалле может эффективно противодействовать влиянию этих внешних условий.

Следовательно, используя преломление света, можно сформировать эффективную динамическую голограмму в фоторефрактивном кристалле без приложения к кристаллу внешнего электрического поля. Мы можем построить систему регулировки фазы на основе этой динамической голограммы на основе этого.

Мы можем построить адаптивный голографический интерферометр в фоторефрактивном кристалле, используя два луча: один из лучей получается частичным отражением световой волны, входящей в кристалл от входной грани (рисунок 3.1*a*). Когда исходная световая волна получается на выходе многомодового волокна (МВС) или формируется за счет рассеяния когерентного излучения на шероховатой поверхности и имеет сложное распределение интенсивности спеклов (рисунок 3.1), то голограмма, формируемая этой волной. Эффективность дифракции будет зависеть от пространственных координат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Когда продольная длина спекла меньше толщины кристалла, хаотическое изменение картины спекла, характерное для МПС, не приводит к непрерывному вкладу модуляции мощности дифрагированного излучения в изменение энергии поперек кристалла в различных «слоях» объемной

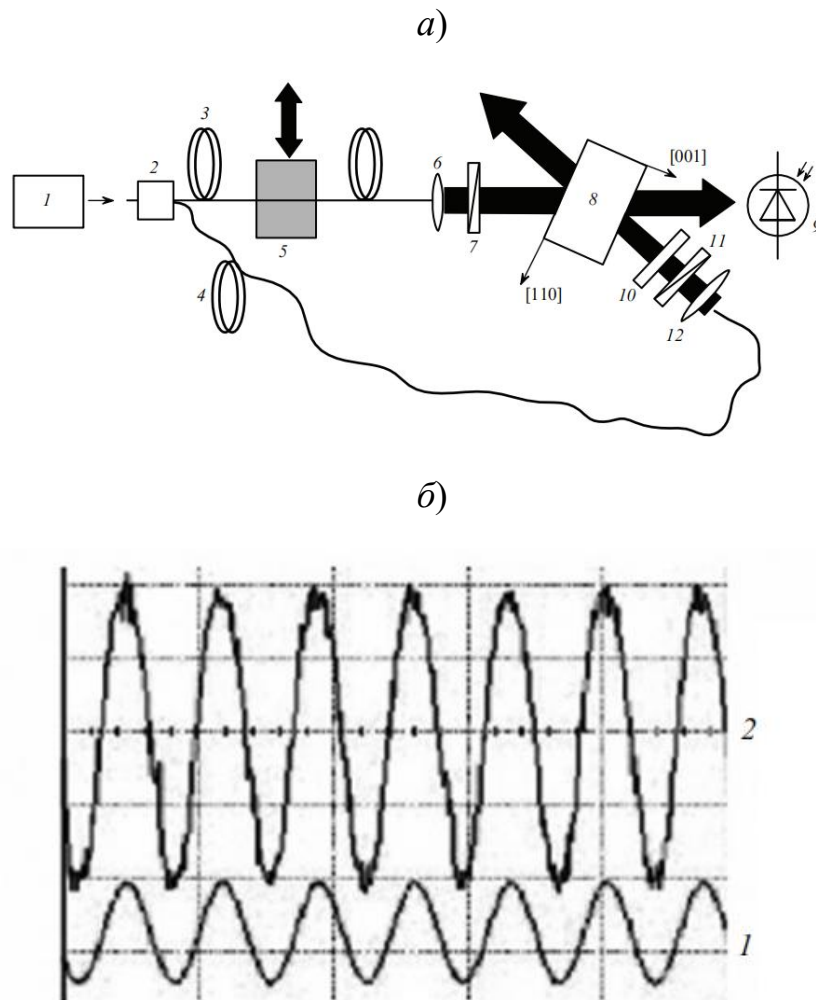
голограммы из-за статистического среднего. Спекл-картина изменяется детерминировано, когда волна, содержащая спекл-структуру, отражается от колеблющегося зеркала, повернутого к нему под углом 45° (рисунок 3.1а), регистрируется демодулированный сигнал. рисунок 3.2б фиксирует введение гармоник в исходной волне. Форма демодулированного сигнала при фазовой модуляции волны $\Delta\Phi = \Phi_0 \sin \Omega t$.



1 – лазер; 2 – многомодовый волоконный световод (МВС); 3 – звуковой генератор (ЗГ); 4 – динамик; 5 – зеркало; 6 – линза; 7 – поляризатор; 8 – фотодетектор (ФД); 9 – анализатор; 10 – фоторефрактивный кристалл $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО); P – входной световой пучок (волна накачки); R – отраженный световой пучок (сигнальная волна); на верхней фотографии представлено распределение интенсивности поля излучения на выходе МВС.

Рисунок 3.1 – Схема адаптивной спекл-корреляционной измерительной системы на основе динамической голограммы Денисюка (а) и осциллограммы модуляционного сигнала (1) и сигнала фотодетектора, регистрирующего мощность отраженного на голограмме излучения (2) (б)

Эксперимент по реализации адаптивного голографического интерферометра на основе зависимости эффективного коэффициента усиления Γ_{eff} и дополнительного поворота плоскости поляризации отраженной волны $\Delta\xi_R$ от угла ξ_0 между плоскостью поляризации входной волны и осью $[001]$ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20} : \text{Ga, Ga}$ (срез (100) , толщина $d=8\text{мм}$), показан на рисунок 3.2.



1- лазер; 2 - оптический разветвитель; 3,4- сигнальный и опорный волоконные световоды соответственно; 5 - модуляционное воздействие на волоконный световод; 6, 12 - линзы; 7 — поляризатор; 8 - фоторефрактивный кристалл; 9 - фотодетектор; 10 — анализатор; 11 - четвертьволновая пластинка.

Рисунок 3.2 – Схема адаптивного волоконно-оптического интерферометра на основе голограммы Денисюка (а) и осциллограммы модуляционного сигнала (1) и сигнала фотодетектора (2) (б)

3.2 Выбор ориентации взаимодействия относительно кристаллофизических осей кристалла ВТО

Из рисунка 3.2 следует, что в основе работы фоторефрактивного адаптивного интерферометра лежит встречное взаимодействие сильного опорного пучка и слабого сигнального пучка, который испытывает воздействие при прохождении вибрирующего объекта. Схема такого взаимодействия показана на рисунке 1.1. Интенсивность слабой сигнальной волны при ее синусоидальной фазовой модуляции в установившемся периодическом режиме можно рассчитать по формулам (2.16)-(2.24). Ясно, что в технических приложениях общее аналитическое описание на основе этих формул является громоздким и малоприменимым. Упрощение этого описания можно достичь специальным выбором ориентации вектора фоторефрактивной решетки \mathbf{K} (см. рисунка 1.2) относительно осей кристалла и специальным выбором поляризации падающих на кристалл волн.

Формулы (2.16)-(2.24) значительно упростятся, если при указанном выборе величина $h(x)$ (см. формулу (2.7)) обратиться в ноль. Это условие может быть выполнено, если обратится в ноль коэффициент $g_E \equiv 0$ и обратится в ноль одна из амплитуд сильных собственных волн, появляющихся в результате преломления на границе $x=d$ сильной волны накачки (либо $R_1 \equiv 0$, либо $R_2 \equiv 0$). Из результатов работы [12] следует, что $g_E \equiv 0$ при ориентации вектора \mathbf{K} вдоль оси [010] и при условии, что падающая волна имеет левую циркулярную поляризацию ($R_1=0$ и $R_2 \neq 0$). При этом будем считать, что падающая волна имеет линейную поляризацию, ориентированную под углом θ к оси [100]. Схема такого взаимодействия показана на рисунке 3.3.

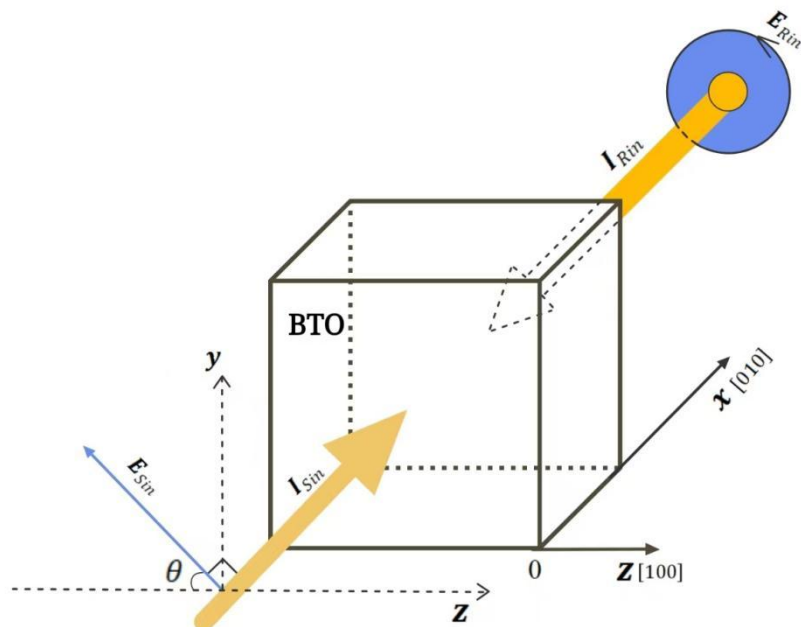


Рисунок 3.3 – Схема встречного двухпучкового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле.

3.3 Управление частотой временной модуляции слабой сигнальной волны за счет специального выбора толщины кристалла и специального выбора угла ее поляризации.

Так как численный анализ показал, выполненный в пункте 2.2 показал, что для амплитуд синусоидальной фазовой модуляции $\varphi_m < 45^\circ$ основной вклад во временную модуляцию поля пространственного заряда дают первая и вторая гармоники с амплитудами, определяемыми через функциям Бесселя нулевого, первого и второго порядков, то при расчете интенсивности слабой сигнальной волны также можно ограничиться только этими гармониками. Тогда для рассматриваемого взаимодействия (см. рисунка 3.3) можно получить следующее выражение, описывающее интенсивность слабой сигнальной волны на выходе из кристалла ($x=d$)

$$\begin{aligned}
I_S(t) = & \left(1 - \sqrt{1 - m_{st}^2}\right) \frac{I_0}{4} + \left(1 + \sqrt{1 - m_{st}^2}\right) I_0 \left(\frac{G}{4\Delta k} m_{st}\right)^2 \left(J_0(\varphi_m)^2 + 2J_1(\varphi_m)^2\right) \times \\
& \times \left(1 - \cos(\Delta kd)\right) - \frac{m_{st}^2 I_0}{4\sqrt{2}} \frac{G}{\Delta k} \operatorname{Im} \left[\left[J_0(\varphi_m)^2 - 2J_1(\varphi_m)^2 + 2J_n(2, \varphi_m)^2 + \right. \right. \\
& + \left. \left. \left(2J_1(\varphi_m)^2 + 2J_n(2, \varphi_m)^2 + 4J_0(\varphi_m)J_n(2, \varphi_m)\right) \cos(2\Omega t) + \right. \right. \\
& \left. \left. + 4iJ_1(\varphi_m)J_0(\varphi_m)\sin(\Omega t) \right] \left(1 - \cos(\Delta kd) - i\sin(\Delta kd)\right) \exp(i\theta) \right] \quad . \quad (3.1)
\end{aligned}$$

Анализ последней формулы показывает, что в случае специально подобранной толщины кристалла, равной

$$d \equiv \frac{\pi s}{\Delta k} = \frac{\pi s}{2\rho} \quad (s \in N) \quad (3.2)$$

можно управлять частотой временной модуляции интенсивности I_s . Действительно при толщине кристалла, описываемой последней формулой, выражение для интенсивности упрощается к виду

$$\begin{aligned}
I_S(t) = & \left(1 - \sqrt{1 - m_{st}^2}\right) \frac{I_0}{4} + \left(1 + \sqrt{1 - m_{st}^2}\right) I_0 \left(\frac{G}{4\Delta k} m_{st}\right)^2 \left(J_0(\varphi_m)^2 + 2J_1(\varphi_m)^2\right) \times \\
& \times \left(1 - \cos(\Delta kd)\right) - \frac{m_{st}^2 I_0}{2\sqrt{2}} \frac{G}{\Delta k} \operatorname{Im} \left[\left[J_0(\varphi_m)^2 - 2J_1(\varphi_m)^2 + 2J_n(2, \varphi_m)^2 + \right. \right. \\
& + \left. \left. \left(2J_1(\varphi_m)^2 + 2J_n(2, \varphi_m)^2 + 4J_0(\varphi_m)J_n(2, \varphi_m)\right) \cos(2\Omega t) + \right. \right. \\
& \left. \left. + 4iJ_1(\varphi_m)J_0(\varphi_m)\sin(\Omega t) \right] \exp(i\theta) \right] \quad . \quad (3.3)
\end{aligned}$$

Тогда выбирая угол поляризации падающей волны, равный либо $\theta=0^\circ$ ($\exp(i\theta)=1$), либо $\theta=90^\circ$ ($\exp(i\theta)=i$) можно добиваться режима колебаний интенсивности I_s с частотой Ω , либо с частотой 2Ω , соответственно. В первом случае ($\theta=0^\circ$) формулу для интенсивности сигнальной волны можно преобразовать к виду:

$$I_L(t) = m_{st}^2 \frac{I_0}{8} \left[1 + 2 \left(\frac{G}{\Delta k} \right)^2 J_0(\varphi_m)^2 - 8\sqrt{2} \frac{G}{\Delta k} J_1(\varphi_m)J_0(\varphi_m)\sin(\Omega t) \right]. \quad (3.4)$$

где I_{S0} есть интенсивность сигнальной волны на входе кристалла. Во втором случае ($\theta=90^\circ$) к виду:

$$\begin{aligned}
I_{\varrho}(t) = m_{st}^2 \frac{I_0}{8} & \left[\left(1 + \frac{m_{st}^2}{4} \right) + 2 \left(1 - \frac{m_{st}^2}{4} \right) \left(\frac{G}{\Delta k} \right)^2 \left(J_0(\varphi_m)^2 + 2J_1(\varphi_m)^2 \right) - \right. \\
& - 2\sqrt{2} \frac{G}{\Delta k} \left(J_0(\varphi_m)^2 - 2J_1(\varphi_m)^2 \right) - 4\sqrt{2} \frac{G}{\Delta k} \left(J_1(\varphi_m)^2 + \right. \\
& \left. \left. + 2J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m) \right) \cos(2\Omega t) \right] \quad (3.5)
\end{aligned}$$

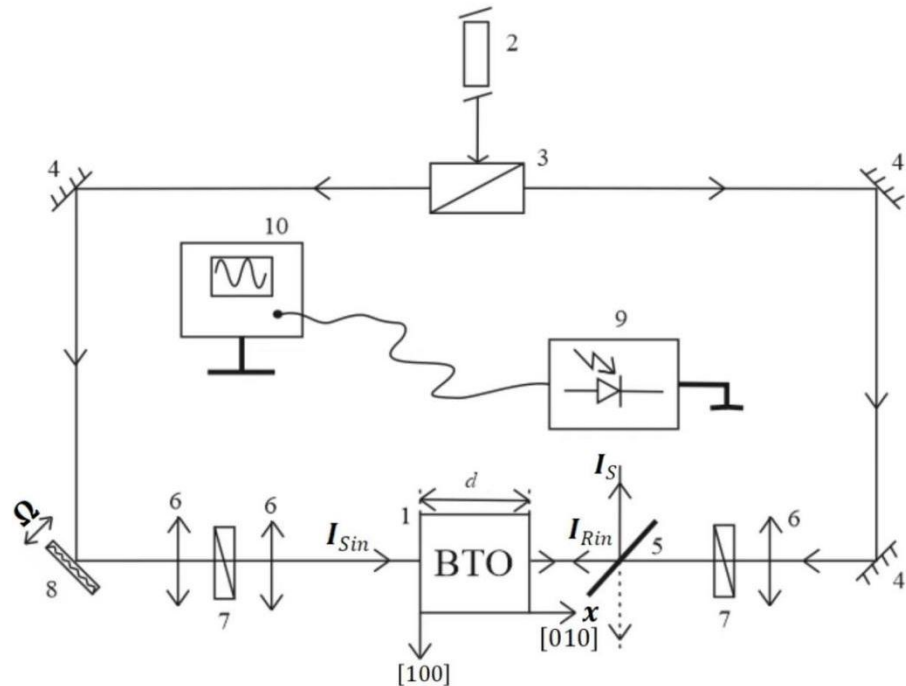
Таким образом, при ориентации вектора фоторефрактивной решетки \mathbf{K} вдоль оси $[010]$ кристалла ВТО и при специально подобранной толщине кристалла, а также при условии, что падающая волна имеет левую циркулярную поляризацию ($R_1=0$ и $R_2 \neq 0$) линейный режим фазовой демодуляции реализуется при линейно поляризованной сигнальной волне вдоль оси $[100]$, а квадратичный режим реализуется при линейно поляризованной сигнальной волне перпендикулярно оси $[100]$.

3.4 Адаптивный фоторефрактивный интерферометр в линейном и квадратичном режимах фазовой демодуляции.

Схема интерферометра показана на рисунке 3.4. Основой интерферометра является кристалл титаната висмута 1 ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) с просветленными входной и выходной гранью $[010]$. Ориентация двух других граней может быть любой. Для определенности считается, что грань в плоскости рисунка есть $[001]$, последняя третья грань $[100]$. Таким образом можно использовать прямоугольный образец с естественными кристаллофизическими гранями. Будем считать, что используемый кристалл имеет следующие фоторефрактивные параметры: $N_A=10^{23} \text{ м}^{-3}$; $N_D=10^{25} \text{ м}^{-3}$; $\mu=10^{-5} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_{\text{TR}}=10^{-10} \text{ м}^2/\text{В}$, $s_D=2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Дж}$, $I_0=10^3 \text{ Вт/м}^2$.

Лазер 2 генерирует световой пучок на длине световой волны $\lambda=633 \text{ нм}$, который делительным кубиком расщепляется на два световых пучка, сигнальный и опорный. Опорный луч при помощи глухих зеркал 4 правого (опорного) плеча интерферометра попадает на анализатор 6. Этот анализатор предназначен для преобразования поляризации пучка от лазера, который изначально может иметь произвольную поляризацию или быть не поляризованным, в линейную поляризацию. Четвертьволновая пластинка

правого плеча преобразует линейно поляризованный пучок в пучок с круговой левой круговой поляризацией (может быть настроена на преобразование в правую круговую поляризацию). После четвертьволновой пластинки пучок проходит полупрозрачное зеркало 5. Пройдя его часть с интенсивностью I_{Rin} падает на выходную грань кристалла толщиной d . Отраженная (паразитная) часть уходит за пределы интерферометра.



- 1 – титанат висмута ($B_{12}TiO_{20}$); 2 – лазер; 3 – делительный кубик;
 4 – глухие зеркала; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – анализатор;
 7 – четвертьволновая пластинка; 8 – вибрирующую поверхность;
 9 – фотодиод; 10 – осциллограф или персональный компьютер

Рисунок 3.4. – Схема интерферометра показана.

Сигнальный пучок через глухое зеркало 4 левого (сигнального) плеча интерферометра попадает на вибрирующую поверхность 8. Далее анализатор 6 преобразует поляризацию отраженного пучка в линейную поляризацию. Затем четвертьволновая пластинка 7 преобразует линейную поляризацию в круговую поляризацию (не важно, левую или правую). Анализатор 7 непосредственно перед входной гранью кристалла предназначен для задания необходимой ориентации линейной поляризации падающего на кристалл сигнального пучка с

интенсивностью I_{sin} . Сигнальный и опорный пучок в кристалле распространяются строго навстречу друг другу.

Для реализации линейного или квадратичного режима работы интерферометра толщина кристалла должна быть выбрана в соответствии с формулой (3.2) и для кристалла ВТО на рисунок 3.4 с удельным вращением плоскости поляризации, равным $\rho=6^\circ \text{ мм}^{-1}$ равна $d=1.5 \text{ см}$. При этом линейный режим фазовой демодуляции реализуется при линейной поляризации падающего сигнального пучка вдоль оси $[100]$ (в плоскости рисунка), а квадратичный режим реализуется при линейной поляризации падающего сигнального пучка вдоль оси $[001]$ (перпендикулярно плоскости рисунка).

На рисунке 3.5 представлены зависимости интенсивности сигнального пучка на выходе из кристалла для линейного (*a*) и квадратичного (*б*) режима работы интерферометра в случае амплитуды фазовой модуляции сигнальной волны, равной $\varphi_m=10^\circ$.

Найдем связь между амплитудой φ_m и амплитудой a_m механических смещений вибрирующего объекта δ в направлении распространения сигнального пучка (см. рисунок 3.4). Ее нетрудно получить в виде

$$a_m = \frac{\varphi_m}{2\pi} \lambda; \quad (3.6)$$

Поэтому амплитудам колебаний интенсивности I_s на рисунке 3.5 отвечает амплитуда механических колебаний, равная $a_m=17.5 \text{ нм}$.

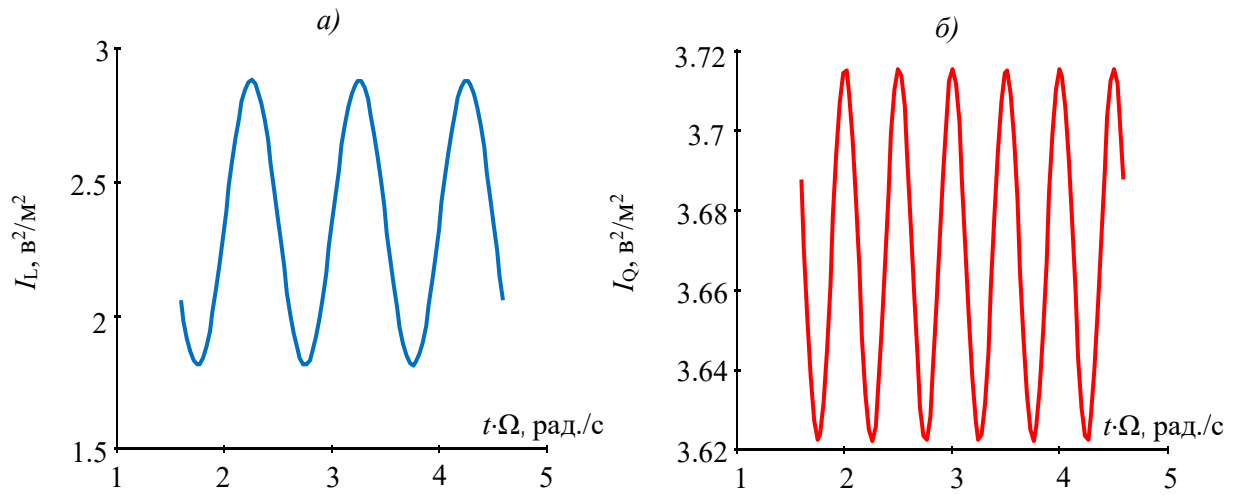


Рисунок 3.5 – Зависимости интенсивности сигнальной волны в линейном (а) и квадратичном (б) режимах работы.

3.5 Амплитудные характеристики адаптивного фоторефрактивного интерферометра в линейном и квадратичном режимах

Интерферометр предназначен для определения амплитуды a_m по амплитуде колебаний интенсивности I_m , которая им и измеряется. Из формул (3.4) и (3.5) нетрудно получить амплитудные зависимости в виде:

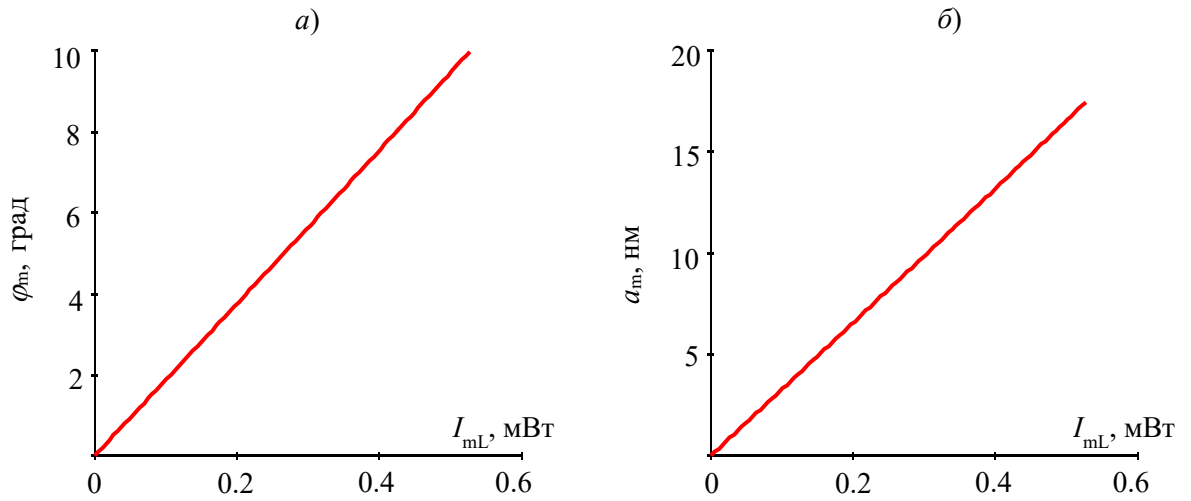
$$I_{mL} = 4\sqrt{2}I_{S0} \frac{G}{\Delta k} J_1(\varphi_m) J_0(\varphi_m) \approx 4\sqrt{2}I_{S0} \frac{G}{\Delta k} J_1(\varphi_m); \quad (3.7)$$

для линейного режима и

$$\begin{aligned} I_{mQ} &= 2\sqrt{2}I_{S0} \frac{G}{\Delta k} \left(J_1(\varphi_m)^2 + 2J_0(\varphi_m) J_n(2, \varphi_m) \right) \approx \\ &\approx 2\sqrt{2}I_{S0} \frac{G}{\Delta k} \left(J_1(\varphi_m)^2 + 2J_n(2, \varphi_m) \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

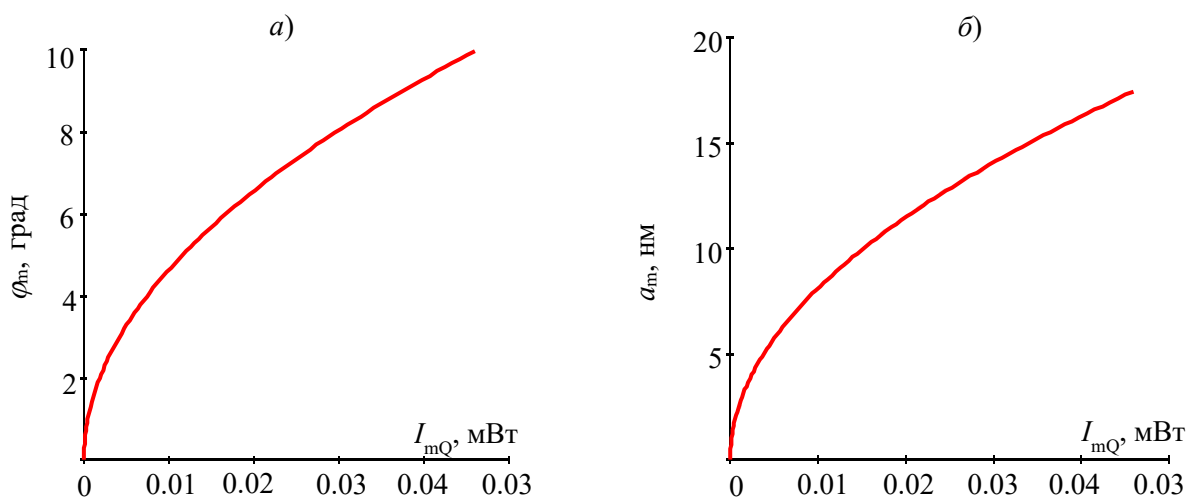
для квадратичного режима, соответственно.

Амплитудные характеристики показаны на рисунке 3.6 и 3.7



a – зависимость амплитуды фазы от амплитуды интенсивности волны, *б* – зависимость амплитуды механических колебаний вибрирующего объекта об от амплитуды интенсивности волны.

Рисунок 3.6 – Амплитудная характеристика в линейном режиме



a – зависимость амплитуды фазы от амплитуды интенсивности волны, *б* – зависимость амплитуды механических колебаний вибрирующего объекта об от амплитуды интенсивности волны.

Рисунок 3.7 – Амплитудная характеристика в квадратичном режиме

При измерении предельно малых механических вибраций $\varphi_m \rightarrow 0$ ($a_m \rightarrow 0$) вместо формул (3.7) и (3.8) можно использовать их следующие приближенные аналоги, полученные разложением в ряд Тейлора [***] и удерживанием первых отличных от нуля его членов:

$$I_{mL} = 2\sqrt{2}I_{S0} \frac{G \pi}{\rho \lambda} a_m; I_{mQ} = 2\sqrt{2}I_{S0} \frac{G \pi^2}{\rho \lambda^2} a_m^2 \quad (3.9)$$

Использование амплитудных характеристик на рисунке 3.6 или 3.7 позволяет определить амплитуду механических колебаний a_m вибрирующего объекта по амплитуде колебаний интенсивности света, которая преобразуется при помощи оптического приемника либо в колебания тока, либо в колебания напряжения. Недостатком подобного определения величины a_m является градуировка приемника оптического излучения по световой интенсивности. Однако можно освободиться от этого недостатка при использовании для измерения одной и той же величины φ_m или, что, то же самое величины a_m как линейного режима, так и квадратичного режима. В этом случае информацию о величине φ_m или a_m можно извлечь из отношения амплитуд колебаний интенсивности в этих двух режимах, которое может быть получено в виде

$$\delta I = \frac{I_{mQ}}{I_{mL}} = \frac{J_1(\varphi_m)^2 + 2J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m)}{2J_1(\varphi_m)J_0(\varphi_m)} \cong \frac{J_1(\varphi_m)^2 + 2J_2(\varphi_m)}{2J_1(\varphi_m)} \quad (3.10)$$

Как видно последняя формула свободна от интенсивности и напрямую связывает отношение амплитуд колебаний в двух режимах с амплитудой φ_m или a_m .

На рисунке 3.8 представлена амплитудная характеристика при таком дуальном методе измерения. По оси ординат на этом рисунке используется логарифмический масштаб.

При измерении предельно малых механических вибраций $\varphi_m \rightarrow 0$ ($a_m \rightarrow 0$) вместо последней формулы (3.10) можно использовать ее следующий приближенный аналог

$$\delta I = \frac{\varphi_m}{2} = \frac{\pi a_m}{\lambda} \quad (3.11)$$

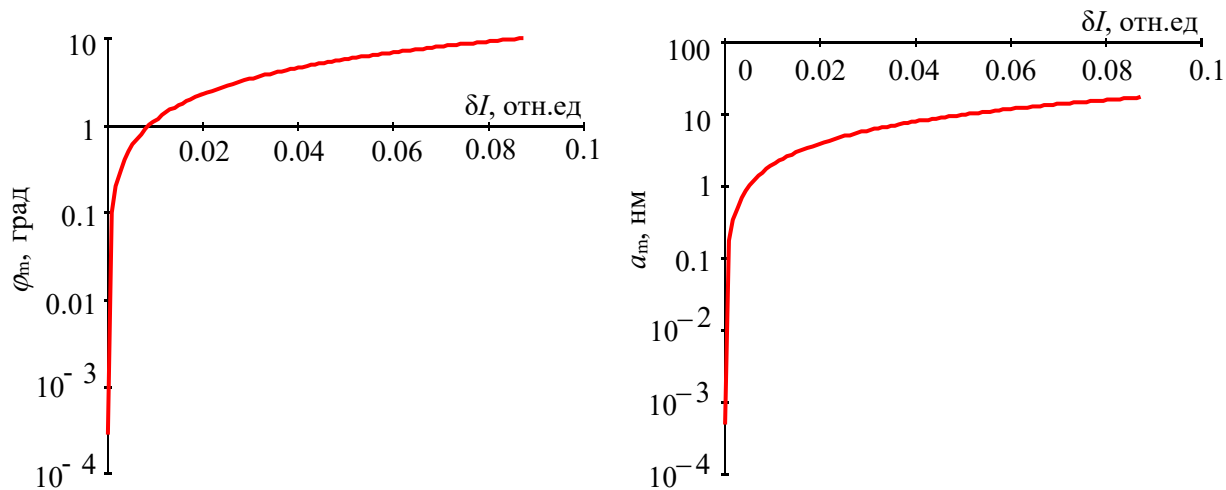


Рисунок 3.8 – Амплитудная характеристика, позволяющая определить амплитуду колебаний вибрирующего объекта без калибровки приемника оптического излучения по интенсивности.

Показано, что в основе работы фоторефрактивного адаптивного интерферометра лежит встречное взаимодействие сильного опорного пучка и слабого сигнального пучка, который испытывает воздействие при отражении от вибрирующего объекта. Разработана схема такого взаимодействия в кристалле титаната висмута. Для упрощения измерений необходимо вырезать кристалл так, чтобы его грани были ориентированы по естественным кристаллофизическим плоскостям. Толщина кристалла должна быть такой, что ее произведение на величину двулучепреломления должно быть кратным целому числу π . При этом опорный пучок должен иметь циркулярную поляризацию, падающий сигнальный пучок должен быть линейно-поляризованным. Линейный режим фазовой демодуляции реализуется при линейной поляризации падающего сигнального пучка вдоль оси $[100]$, а квадратичный режим реализуется при линейной поляризации падающего сигнального пучка вдоль оси $[001]$.

Определение амплитуды механических колебаний вибрирующего объекта по амплитуде колебаний интенсивности света, которая преобразуется при помощи оптического приемника либо в колебания тока, либо в колебания напряжения, требует градуировки приемника оптического излучения по

световой интенсивности. Освободится от этого недостатка при использовании для измерения одной и той же амплитуды механических колебаний как линейного режима, так и квадратичного режима. В этом случае информацию о величине амплитуды механических колебаний можно извлечь из отношения амплитуд колебаний интенсивности в этих двух режимах. Такое измерение не требует градуировки приемника оптического излучения по световой интенсивности.

РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Для адаптивных интерферометров можно выделить следующие свойства: лазерные излучатели, фоторефрактивные кристаллы, фотодиоды, осциллографы, полупрозрачные зеркала, вибрирующую поверхность, разрезные кубы и др (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Морфологическая матрица для адаптивных интерферометров.

	1	2	3	4	5
А. Лазерные излучатели	лазерная указка	Лазерный уровень	Полупроводниковые лазеры.	...	Газовые лазеры
Б. Фоторефрактивные кристаллы	$\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$	LiNbO_3	NBN	...	NK
В. Осциллографы	компьютер	аналоговый осциллограф	цифровой осциллограф	...	
Г. Полупрозрачные зеркала	Стекло с металлическим покрытием с одной стороны	Кристалл, покрытый металлом с одной стороны		...	
Д. Расщепленные кубы	разделенный куб из стекла	расщепленный куб из хрусталя	Пластиковые разделенные кубики	...	Разделенные кубики смолы
Е. Отражатели	отражатель	металлическая пластина	зеркало	...	Рассеиватели

С точки зрения функционального наполнения и экономии ресурсов мы можем получить следующие решения: АЗБ1В2Г1Д1Е1

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

Исполнителей два человека, а именно научный руководитель проекта (НР) и инженера(И), предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные сведены в таблицу:

Таблица 4.2 – Перечень работ и продолжительность их выполнения.

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100 %
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100 % И – 10 %
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100 % И – 10 %
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 60 % И – 100 %
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 60 % И – 100 %
Знание программ mathcad	И	И – 100 %
Моделирование	И	И – 100 %
Сбор данных	НР, И	НР – 30 % И – 100 %
Анализ данных	НР, И	НР – 20 % И – 100 %
Технико-экономическое обоснование проекта	НР, И	НР – 40 % И – 100 %
Оценка безопасности и экологичности работы	НР, И	НР – 30 % И – 100 %
Составление и оформление пояснительной записки	И	И – 100 %
Защита дипломного проекта	И	И – 100 %

В нашем случае расчет ведем для шестидневной рабочей недели, $T_k=1,22$

Таблица 4.3 – Трудозатраты на выполнение проекта.

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.дн.			
		t_{\min}	t_{\max}	$t_{\text{ож}}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	1	2	1,4	1,68	0,00	2,05	0,00
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	1	2	1,4	1,68	0,17	2,05	0,20
Разработка календарного плана	НР, И	2	3	2,4	2,88	0,29	3,51	0,35
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	5	7	5,8	4,18	6,96	5,09	8,49
Обсуждение литературы	НР, И	1	2	1,4	1,01	1,68	1,23	2,05
Знание программ mathcad	И	5	10	7	0,00	8,40	0,00	10,25
Моделирование	И	7	12	9	0,00	10,80	0,00	13,18
Сбор данных	НР, И	10	15	12	4,32	14,40	5,27	17,57
Анализ данных	НР, И	7	10	8,2	1,97	9,84	2,40	12,00
Технико-экономическое обоснование проекта	НР, И	2	4	2,8	1,34	3,36	1,64	4,10
Оценка безопасности и экологичности работы	НР, И	2	4	2,8	1,01	3,36	1,23	4,10
Составление и оформление пояснительной записки	И	7	12	9	0,00	10,80	0,00	13,18
Защита дипломного проекта	И	1	2	1,4	0,00	1,68	0,00	2,05
Итого:				71,60	20,06	80,14	24,48	97,77

4.3 Бюджет научно-технического исследования

4.3.1 Расчет затрат на материалы

Таблица 4.4 – Расчет затрат на материалы.

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
USB Flash Drive 4 Gb	500	1	500
Ручка	10	1	10
Карандаш	5	1	5
Тетрадь	12	1	12
Бумага для принтера формата А4	250	1	250
Картридж для принтера	1550	1	1550
Итого:			2327

Расчет затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Затраты на электроэнергию технологическую.

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $\text{Э}_{об}$, руб.
Персональный компьютер	641,1	0,3	1011,06
Принтер	5,0	0,2	5,26
Контроллер КРОСС	512,9	0,1	269,62
Итого:			1285,93

4.3.2 Расчет амортизационных расходов

Для ПК (300 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять $FД = 300 \times 8 = 2400$ часа;

Для принтера $FД = 500$ часов;

Для контроллера КРОСС $FД = 2400$ часов;

Для ПК $trф = 641,1$ часа. Для принтера $trф = 5$ часов.

Для контроллера КРОСС $FД trф = 512,9$ часа.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Для определения НА следует обратиться к постановлению

правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы». Оно позволяет получить рамочные значения сроков амортизации (полезного использования) оборудования $C \equiv A$.

Для ПК возьмем $CA = 2,5$ года. Далее определяется HA как величина обратная CA , в данном случае это $1: 2,5 = 0,4$.

Для принтера $CA = 2$ года, $HA = 0,5$.

Для контроллера КРОСС $CA = 2,5$ года $HA = 0,4$;

$$САМ(ПК) = (0,4 \times 45000 \times 641,1 \times 1) / 2400 = 4808,25 \text{ руб};$$

$$САМ(Пр) = (0,5 \times 12000 \times 5 \times 1) / 500 = 60 \text{ руб};$$

$$САМ(К) = (0,4 \times 25000 \times 512,9 \times 1) / 2400 = 2173,08 \text{ руб}.$$

Итого начислено амортизации 7041,33 руб.

4.3.3 Расчет заработной платы

Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{дн-т}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн-т} = MO / 25.58,$$

учитывающей, что в году 300 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 25 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.5. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 4.1. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{ПР} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,188$; $K_p = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{и} = 1,1 \times 1,188 \times 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное значение $K_{доп.ЗП}$ применяется при шестидневной рабочей неделе.

Таблица – 4.7 Затраты на заработную плату.

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фондз/платы, руб.
НР	23264,86	930,59	20	1,699	31722,79
И	14874,45	594,98	80	1,699	81006,89
Итого:					112729,67

Отчисления во внебюджетные фонды = $112729,67 \times 0,3 = 33818,9$ руб.

4.3.4 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10 % от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot 0,1$. Для нашего примера это $C_{\text{проч.}} = (2443,45 + 112729,67 + 33818,9 + 1285,93 + 7041,33) \times 0,1 = 15487,58$ руб.

Таблица – 4.8 Смета затрат на разработку проекта.

Статья затрат	Сумма, руб.	
	Исп.1	Исп.2
Материалы и покупные изделия	3612,93	1 285,93
Амортизационные отчисления	7041,33	7041,33
Основная заработная плата	112729,67	133844,89
Отчисления в социальные фонды	33818,90	40153,47
Прочие расходы	15487,58	21415,18
Итого:	172690,41	203740,8

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального финансового показателя, определяемого по следующей формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.1)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Φ_{\max} зависит от сложности проекта для которого разрабатывается АСУ.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{172690,41}{203740,8} = 0,85 \quad (4.2)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{203740,8}{203740,8} = 1. \quad (4.3)$$

Сравнительный анализ вариантов исполнения объекта исследования приведен в таблице 4.9.

Таблица – 4.9 Сравнительная оценка вариантов исполнения инженера.

Критерии	Весовой коэффициент	Исп.1	Исп.2
Надежность	0,29	4	3
Удобство в эксплуатации	0,19	4	5
Технический уровень	0,18	5	4
Непрерывно излучайте лазерный свет	0,33	5	3
Итого	1	30	28

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.4)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a , b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

$$I_{\text{исп. 1инженера}} = 4,28;$$

$$I_{\text{исп. 2инженера}} = 4,13.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурс эффективности и интегрального финансового показателя результат в таблице 4.9.

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов

исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Результаты расчета показателей сведены в таблицу 4.5.

Таблица – 4.10 Сравнительная эффективность разработок.

Показатель	Вариант	
	Исп.1	Исп.2
Интегральный финансовый показатель	0,85	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,28	4,13
Интегральный показатель эффективности	5,03	4,13
Сравнительный показатель эффективности	1,2	

Исходя из полученных данных таблицы 4.10, следует, что наиболее эффективной является система (исполнение 1), представленная студентом в предыдущих главах настоящего ВКР.

Итак, в данном разделе представлена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения, которая показала технический уровень предлагаемого технического решения. Определена область применения: Неразрушающий контроль в инженерно-технических испытаниях.

При использовании разработанного адаптивного голографического интерферометра повышается эффективность работы за счет снижения общей стоимости оборудования, повышения надежности, непрерывно излучайте лазерный свет и долговечности эксплуатации.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

1.ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

2.ГОСТ 12.0.003-74* ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы».

3.ГОСТ Р 12.4.026-2001 Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний.

4.Руководство по безопасности факельных систем. Утверждены Приказом от 26 декабря 2012 г. № 779 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.

5. Правила противопожарного режима в Российской Федерации(в ред. Постановления Правительства РФ от 17.02.2014 N 113).

6. ГОСТ 23337–2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий».

7. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022).

8. ГОСТ 31581-2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий».

9. НРБ—76/87 Нормы радиационной безопасности. Утверждены Минздравом 26.05.87 № 4392-87.

5.2 Производственная безопасность «Лазерное измерение» месторождения

Комплекс требований по безопасности при работе с лазерными изделиями включает:

- Операторы должны знать перечень опасных и опасных производственных факторов;
- Наличие оперативной связи для вызова наладчика при нарушении работы лазерных изделий классов 3В и 4 обязательно;
- Траектория прохождения лазерного пучка должна быть заключена в оболочку из несгораемого материала или иметь ограждение, снижающие уровень лазерного излучения при визуальном наблюдении лазерного пучка до ДПИ для класса 1;
- Оболочка или ограждение траектории лазерного пучка должны иметь цветовую или световую маркировку, предупреждающие надписи, знак лазерной опасности;
- Открытые траектории в зоне возможного нахождения человека должны располагаться значительно выше уровня глаз;
- Рабочие места должны быть организованы таким образом, чтобы исключать возможность воздействия на персонал лазерного излучения или чтобы его величина не превышала ДПИ для класса 1;
- Отделку помещений следует выполнять только из негорючих материалов. Не допускается применение глянцевых, блестящих, хорошо (зеркально) отражающих лазерное излучение материалов (коэффициент отражения рекомендуется не более 0,4);
- Двери помещений должны иметь знак лазерной опасности (приложение Б). Кроме того, двери помещений, в которых эксплуатируются лазеры классов 3В и 4, должны быть оборудованы специальным замком и дополнительно иметь надпись: «Посторонним вход запрещен»;
- Помещения должны иметь проточно-вытяжную вентиляцию. При необходимости, рабочие места должны быть оборудованы местной вытяжкой с

целью исключения попадания в рабочее помещение продуктов взаимодействия лазерного и пучения с обрабатываемыми материалами.

5.3 Экологическая безопасность

Отходы при производстве продукции, сточные воды, выбросы в атмосферу, методы их утилизации, переработки.

Отходы – непригодные для производства виды сырья, его неупотребляемые остатки, которые не подвергаются утилизации в технологическом процессе, а также в результате определенного срока службы полностью или частично утратили свои потребительские качества и их дальнейшее применение уже не эффективно. Образование, сбор, накопление, хранение и первичная переработка отходов являются неотъемлемой составной частью технологических процессов, в ходе которых они образуются.

Учету подлежат все отходы.

В процессе эксплуатации установки лазерного контроля образуются следующие виды опасных отходов:

– При воздействии на металлы лазерным излучением увеличивается концентрация металлических аэрозолей в воздухе. Концентрации металлических аэрозолей определяются в любое время спектроскопическими и полярографическими методами.

– При работе лазерной установки возможно загрязнение воздуха озоном, и содержание озона следует контролировать фотометрическими методами, основанными на реакции озона с молярными солями и образовании железотиоцианатных комплексов.

– Устаревшие мониторы, образовавшиеся в результате замены бывших в употреблении или неисправных осциллографов. Из-за наличия пригодных для использования металлов их отправляют на станции переработки.

– Большое количество стеклянных изделий, отражающих зеркал, полупрозрачных зеркал, сплит-кубов и других стеклянных изделий будет заменено в процессе использования оборудования, и они будут отправлены на станцию утилизации для переработки.

– Мусор от бытовых помещений организаций несортированный (исключая крупногабаритный) образуется в результате производственной деятельности персонала. По мере накопления вывозятся на Средненюрольское м/р ООО «ННК-ВТК».

– Ртутные термометры отработанные и брак образуются в результате эксплуатации ртутных термометров в ИЛН. По мере накопления вывозятся на полигон токсичных отходов г. Томска ОАО «Полигон».

– Ртутные лампы, люминесцентные ртутьсодержащие трубки отработанные и брак образуются в результате замены пришедших в негодность ламп системы освещения помещений и промплощадки. По мере накопления вывозятся на полигон токсичных отходов г. Томска ОАО «Полигон».

– Устаревший лазерный передатчик. По мере накопления вывозятся на полигон токсичных отходов г. Томска ОАО «Полигон».

Обращение с каждым видом отходов производства и потребления зависит от их происхождения, агрегатного состояния, физико-химических свойств субстрата, количественного соотношения компонентов и степени опасности для здоровья населения и среды обитания человека. По отношению ко всем отходам должен проводиться визуальный контроль над соблюдением правил хранения и своевременным вывозом, который осуществляется в соответствии с «Инструкциями по обращению с отходами производства и потребления», разработанными отдельно для каждого вида отходов.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Необходимо соблюдать осторожность при работе с излучением мощных лазеров, так как при попадании излучения на горючие материалы возможно их возгорание.

При аварии персонал обязан:

– при коротком замыкании, обрыве в системах электропитания отключить главный сетевой рубильник в помещении и вызвать лицо, ответственное за эксплуатацию аппаратуры в помещении;

– при поражении человека электрическим током и прочих травмах

действовать согласно инструкции «Первая помощь пострадавшим от электрического тока и при других несчастных случаях»;

– при поломке коммуникационных систем водоснабжения, отопления и вентиляции, препятствующих выполнению медицинских операций или процедур, прекратить работу до ликвидации аварии, сообщить руководителю подразделения и принять меры к предупреждению возможных аварий.

Средства защиты работающих.

Когда персонал работает в зоне работы с лазером, при необходимости используйте средства индивидуальной защиты (например, очки для лазерного излучения), чтобы предотвратить опасность.

Должна быть обеспечена соответствующая защитная одежда, если персонал может подвергаться воздействию радиации, превышающей ПДК кожи. Обычно используются лицевые щитки или перчатки, но иногда требуется полная защита тела.

Экраны следует использовать как средство предотвращения приближения персонала к опасным уровням лазерного излучения.

В случаях разумно предсказуемой опасности лазерного излучения вход персонала должен быть воспрещен техническими средствами.

Зеркала, линзы и светоделители должны быть надежно закреплены, а их управляемое движение должно происходить только во время работы лазера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе рассмотрен адаптивный фоторефрактивный интерферометр. Показано, что в основе его работы лежат следующие процессы динамического рассеяния света: неоднородное фотовозбуждение свободных электронов; перемещение фотовозбужденных электронов по кристаллу за счет диффузии, дрейфа во внутреннем электрическом поле; захват свободных электронов ловушками и формирование электрического поля пространственного заряда; пространственная и временная модуляция диэлектрической проницаемости кристалла за счет линейного электрооптического эффекта внутренним электрическим полем; обратное влияние модуляции диэлектрической проницаемости среды на световое поле.

В случае двухволнового взаимодействия оптическое поле в кристалле формирует световую решетку. Поэтому поле пространственного заряда, сформированное в кристалле под действием такой засветки имеет аналогичный вид пространственной решетки с амплитудой, изменяющейся во времени и в пространстве. Обратное влияние поля пространственного влияния через линейный электрооптический эффект приводит и к пространственно-временной трансформации амплитуд световых волн.

При фазовой синусоидальной модуляции слабой сигнальной волны, падающей на кристалл, ее интенсивность на выходе из кристалла зависит от времени в любой его промежуток. При этом можно выделить два характерных промежутка. Первый промежуток определяет длительность переходного процесса и имеет протяженность, определяемую временем диэлектрической релаксации (для параметров, принятых в работе эта протяженность имеет порядок 3 мс). Второй бесконечный промежуток соответствует режиму установившихся колебаний, в котором может быть осуществлена фазовая демодуляция сигнала. Разработанная в работе методика фазовой демодуляции пригодна для случая, когда время переходного процесса значительно меньше периода фазовой модуляции, которая для принятых параметров должна быть больше 30 мс, что пригодно для детектирования механических колебаний на пороге разрушения механических конструкций.

Разработана схема фоторефрактивного интерферометра на основе встречного взаимодействия на длине световой волны 633 нм в кристалле титаната висмута, грани которого должны быть ориентированы по естественным кристаллофизическим плоскостям. Для принятой величины двулучепреломления 6 град/мм толщина кристалла вдоль направления [010] взаимодействия должна быть равна 1.5 см. При этом опорный пучок должен иметь циркулярную поляризацию,

Определение амплитуды механических колебаний вибрирующего объекта по амплитуде колебаний интенсивности света осуществляется на основе фазовой демодуляции в кристалле интенсивности сигнальной волны, периодически изменяющейся во времени. Для реализации линейного режима фазовой демодуляции падающий сигнальный пучок должен быть линейно-поляризованным вдоль оси кристалла [100]. Для реализации квадратичного режима фазовой демодуляции падающий сигнальный пучок должен быть линейно-поляризованным вдоль оси кристалла [001].

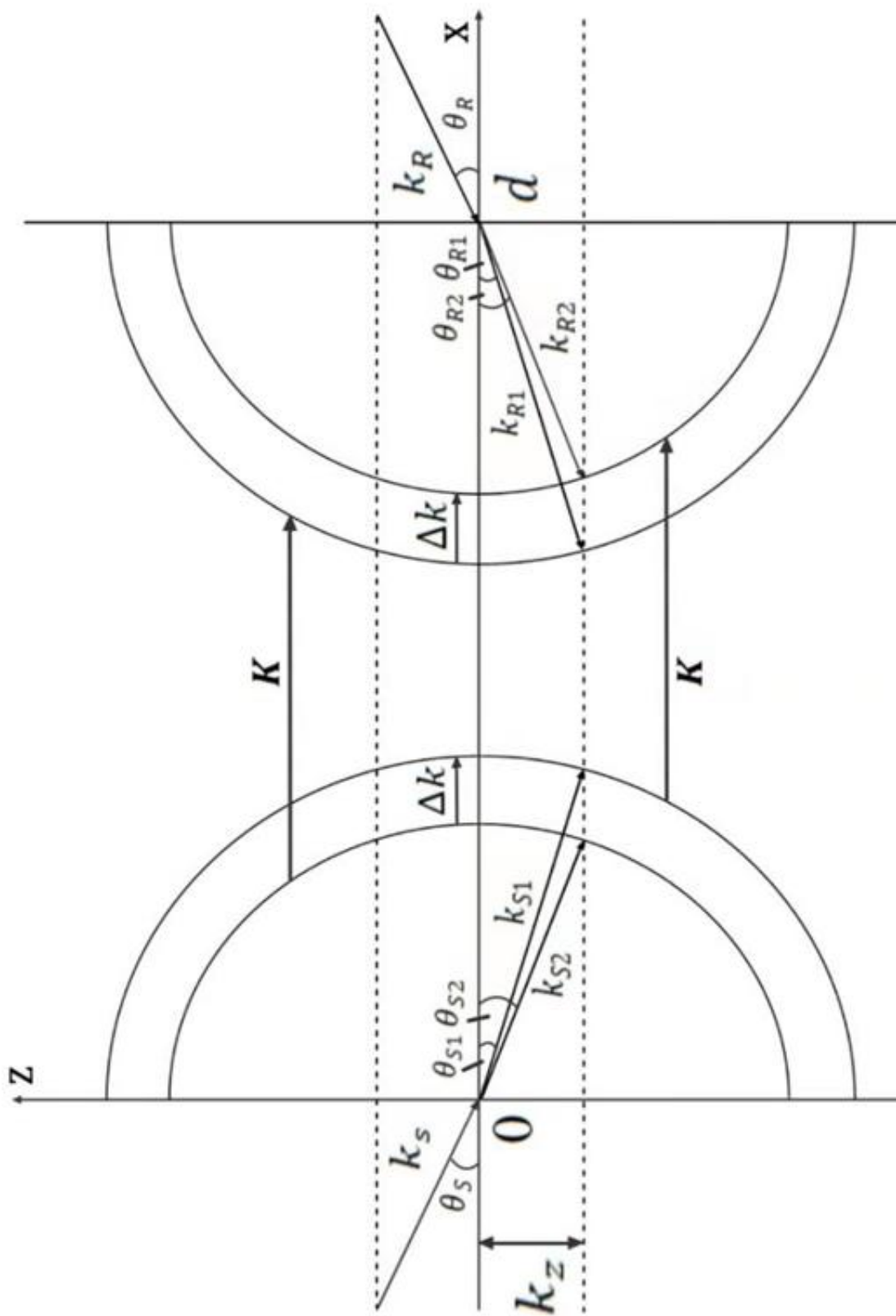
Определение амплитуды механических колебаний вибрирующего объекта по амплитуде колебаний интенсивности света, которая преобразуется при помощи оптического приемника либо в колебания тока, либо в колебания напряжения, требует градуировки приемника оптического излучения по световой интенсивности. Освободится от этого недостатка при использовании для измерения одной и той же амплитуды механических колебаний как линейного режима, так и квадратичного режима. В этом случае информацию о величине амплитуды механических колебаний можно извлечь из отношения амплитуд колебаний интенсивности в этих двух режимах. Такое измерение не требует градуировки приемника оптического излучения по световой интенсивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 256 с.
2. Gunter P., Huignard J.P., eds. Photorefractive materials and Their Applications. I. Fundamental phenomena. II. Applications. Topics in applied physics. Vol. 61. Berlin–Heidelberg, 1988; Vol. 62. Springer–Verlag, 1989. 295 p.
3. Одулов С.Г., Соскин М.С., Хижняк А.И. Лазеры на динамических решетках. М.: Наука, 1990. 271 с.
4. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб: Наука, 1992. 315 с.
5. Staebler D.L. Ferroelectric crystals // Holographic recording materials; Ed. by Smith H.M. Berlin–Heidelberg, Springer–Verlag, 1977. P. 101–132.
6. Литвинов Р. В. Фоторефрактивные голограммы в нецентросимметричных кристаллах. Томск: Томский государственный университет, 2007. 498 с.
7. Винецкий В.Л., Кухтарев Н.В., Одулов С.Г., Соскин М.С. Динамическая самодифракция когерентных световых пучков // УФН. 1979. Т. 129, вып. 1. С. 113–137.
8. Стурман Б.И. Фотогальванический эффект – новый механизм нелинейного взаимодействия волн в электрооптических кристаллах // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 3. С. 483–487.
9. Камшилин А.А., Миридонов С.В., Митева М.Г., Мокрушина Е.В. Голографическая запись в ортогональных лучах в кристаллах титаносилленита // ЖТФ. 1989. Т. 59, вып. 1. С. 113–117.

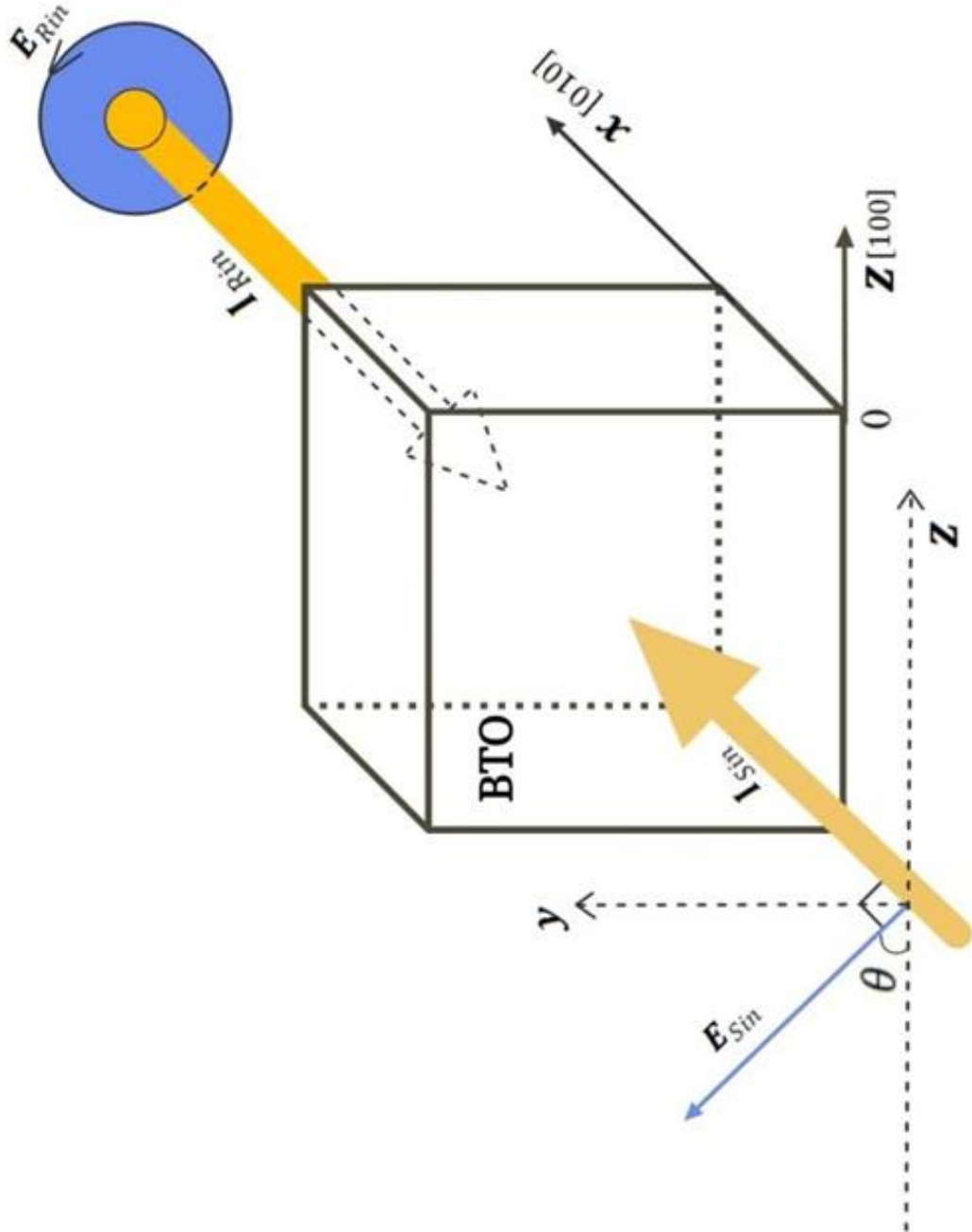
10. Петров М.П., Грачев А.И. Фотогальванические эффекты в силикате висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30, вып. 1. С. 18–21.
11. А. А. Колегов, С. М. Шандаров, Г. В. Симонова, Л. А. Кабанова, Н. И. Буримов, С. С. Шмаков, В. И. Быков, Ю. Ф. Каргин. Квантовая электроника, 2011, том 41, номер 9, 847–852.
12. С. М. Шандаров, Н. И. Буримов, Ю. Н. Кульчин, Р. В. Ромашко, А. Л. Толстик, В. В. Шепелевич. Квантовая электроника, 2008, том 38, номер 11, 1059–1069.
13. James W. Wagner and James B. Spicer. Theoretical noise-limited sensitivity of classical interferometry, J. Opt. Soc. Am. B 4, 1316-1326 (1987).
14. Hall T.J., Fiddy M.A., Ner M.S. Opt. Lett., 5, 485 (1980). Solymar L., Webb D.J., Grunnet-Jepsen A. The Physics and Application of Photorefractive Materials (Oxford: Clarendon Press, 1996).
15. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals – J. Appl. Phys., 105, 031101 (2009).
16. Kukhtarev N. V., Markov V. B., Odulov S. G., Soskin M. S., and Vinetskii V. L. Holographic storage in electrooptic crystals. I. Steady State – Ferroelectrics, 1979, v. 22, pp. 949-960.
17. Абрамовица М., Стигана И. Справочник по специальным функциям. Москва: Науча, 1979, 832 с.
18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Науча, 1973, 831 с.
19. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Наука, 1976, 576 с.

Приложение А
(обязательное)
Поэтажная схема



Приложение Б
(обязательное)

Схема встречного двухлучкового взаимодействия



Приложение В
(обязательное)
Схема интерферометра

