

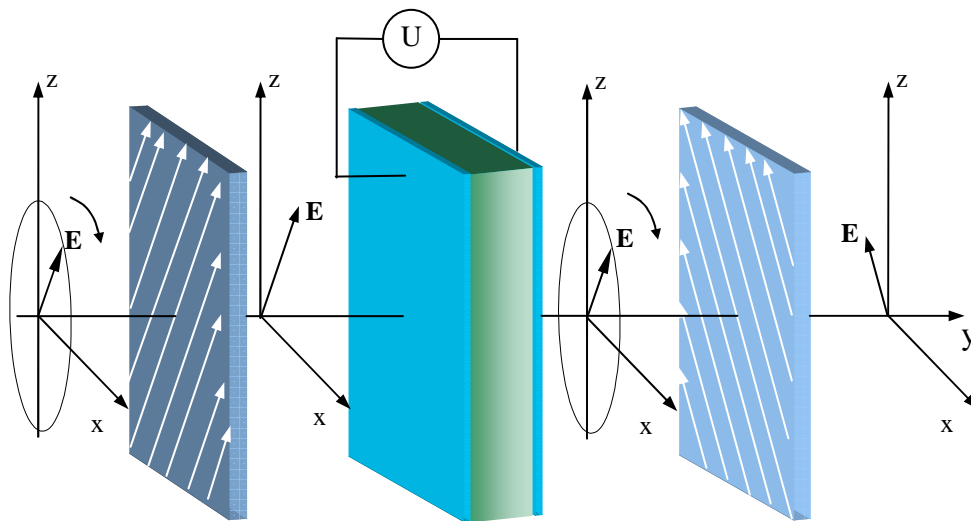


КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ И
КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ (СВЧиКР)

Г.Г.Куш, В.М.Шандаров

Проектирование оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств

Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию



2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники

Г.Г.Куш, В.М.Шандаров

Проектирование оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств

Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию

Томск 2012

Рекомендовано к изданию кафедрой СВЧиКР Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

УДК 537.8(075.8) + 621.371(075.8)

Рецензент:

Хатьков Н.Д., канд. техн. наук, доцент каф. СВЧиКР
Томс. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники;

Проектирование оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств: учебно-методическое пособие // Куш Г.Г., Шандаров В.М./ Под ред. Г.Г. Куш. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 101 с.

В учебно-методическом пособии приведены основные теоретические материалы по проектированию оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств. Рассмотрены общие принципы построения и выбора различных типов приборов и устройств, рассмотрены методы анализа, синтеза и оптимизации параметров приборов, систем радио и оптической связи, методы математического и физического моделирования в процессе исследования и оптимизации параметров отдельных элементов и систем связи в целом, дан расчет АОМ и ЭОМ (параметров и характеристик), которые является неотъемлемой частью проектирования устройств управления выходными параметрами лазерного излучения. Представлены методические рекомендации и примеры решения рассмотренных вопросов.

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения курсовой работы по дисциплине «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства» для студентов всех форм обучения по специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» направления подготовки «Телекоммуникации», а также может быть полезным для студентов специальности 210302 «Радиотехника» по курсу «Оптические устройства в радиотехнике» при подготовке к практическим и при дипломном проектировании.

© Куш Г.Г., Шандаров В.М., 2012

© Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012.

Оглавление

Список условных обозначений и сокращений	7
1. Введение	8
2. Цель и задачи курсовой работы	9
3. Предлагаемые темы кусовых работ.....	11
4. Содержание курсовой работы.....	12
4.1 общие сведения.....	12
4.2. Структура курсовой работы	13
4.3. Общие рекомендации по организации работы.....	13
5. Исходные данные для проектирования.....	15
5.1. Структурная схема ОЭКП	15
5.2. Общие сведения об оптических методах обработки информации	16
5.3. Структура систем оптической обработки сигналов	19
5.4. Акустооптические модуляторы	20
5.4.1. Классификация аом света	20
5.4.2. Принцип действия аом.....	23
5.4.3. Качественное описание явлений дифракции рамана-ната и брэгга.....	23
5.4.4. Основные параметры и характеристики акустооптических модуляторов	25
5.4.5. Оптимизация параметров модулирующей акустооптической ячейки	27
5.5. Структурная схема аом и конструктивные составляющие.....	28
5.5.1. Области применения акустооптического эффекта	31
5.5.2. Преобразователь объёмных акустических волн	31
5.5.3. Возбуждение объёмных акустических волн.....	32
6. Теоретическая часть	37
6.1. Математическая модель преобразователя объёмных акустических волн....	37
6.2. Расчетные соотношения	38
6.2.1. Расчёт волнового числа и длин волн акустической волны в среде.....	38

6.2.2. Расчёт площадей слоёв	39
6.2.3. Расчёт акустических сопротивлений слоёв	40
6.2.4. Расчёт значения излучаемой акустической мощности пьезослоем и величины потерь преобразования.....	41
6.3. Математическая модель потерь акустической мощности	43
6.3.1. Расчёт мощности акустической волны с учётом прохождении через границу раздела двух сред.....	43
6.3.2. Расчёт мощности акустической волны с учетом поглощения в звукопроводе и промежуточном слое	44
6.4. Математическая модель акустооптического модулятора.....	46
6.4.1. Расчёт интенсивности дифрагированного света в режиме дифракции рамана-ната	47
6.4.2. Расчёт полосы акустооптического взаимодействия модуляторов, работающих в режимах дифракции рамана-ната и брэгга.....	51
6.4.2. Расчёт эффективности дифракции и быстрогодействия аом	52
7. Численное моделирование	52
7.1. Результаты численного моделирования.....	54
8. электрооптические модуляторы света (эом)	63
8.1. Краткая теория. Основные соотношения и характеристики.	65
8.1.1. электрооптический эффект.....	65
8.1.2. Прохождение света через анизотропную среду.....	65
8.1.3. Оптические оси кристаллов. Одноосные кристаллы.....	69
8.1.4. Поверхность показателей преломления. Положительные и отрицательные кристаллы	71
8.2. Принцип действия электрооптических модуляторов.....	73
8.2.1. Продольная и поперечная электрооптическая модуляция.....	74
8.3. Результаты расчета основных параметров и характеристик модулятора	83
8.4. Выводы.	85
Список рекомендуемых источников	86

Приложение А. Общетехнические требования к основным параметрам акустооптических модуляторов	88
Приложение Б. Геометрические параметры АОЯ	90
Приложение В. Свойства материалов для звукопровода.....	92
Приложение Г. Свойства материалов для промежуточного слоя.....	94
Приложение Д. Свойства материалов для пьезопреобразователя	95
Приложение Е. Материалы для электрооптических модуляторов	96
Приложение Ж. Примеры некоторых конструкций ЭОМ	97

Список условных обозначений и сокращений

ОЭКПиУ – оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

ВОЛС – волоконно-оптические линии связи

ВОСС – волоконно-оптические системы связи

КР – курсовая работа

ТЗ – техническое задание

$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ – кристалл рубина

СИД – светодиод

п/п – полупроводник

ЛФД – лавинный фотоумножительный диод

ТД – технический документ

РТ – рабочая тетрадь

АОВ – акустооптическое взаимодействие

АОМ – акустооптический модулятор

АОУ – акустооптическое устройство

АОЯ – акустооптическая ячейка

ДД – динамический диапазон

П – продольная акустическая волна

ПМС – пространственные модуляторы света

ПП – пьезопреобразователь

РЛС – радиолокационная станция

РЭС – радиоэлектронные средства

СЗП – светозвукопровод

УЗВ – ультразвуковая волна

ЭОМ – электрооптический модулятор

ЭТУ – эксплуатационно-технический уровень

1. ВВЕДЕНИЕ

Данное методическое пособие посвящено вопросам, касающимся курсовой работы по оптоэлектронным и квантовым приборам и устройствам (ОЭКП и У).

Курсовая работа по ОЭКП и У – многофакторный процесс, во многом зависящий от интуиции, знаний и опыта разработчика.

Это обстоятельство вызывает определенные трудности у начинающих разработчиков, к которым и относятся студенты.

В данной разработке делается главный упор на рассмотрение непосредственных вопросов эскизного моделирования ОЭКП и У, параметров и характеристик полагая, что необходимые теоретические сведения и практические навыки получены студентами на лекционных, практических и лабораторных занятиях.

Следует отметить, что одной из составляющих успешной работы над курсовой работой является ритмичность. Для самооценки проделанной работы следует ориентироваться на приблизительные объемы основных этапов выполнения работы:

Знакомство с литературой, выбор структурной схемы ОЭКП (У) -10%

Обоснование выбранной конструкции ОЭКП (У). Знакомство с принципом действия, параметрами, характеристиками, особенностями 20%

Выбор конструкции ОЭКП (У). Предварительный расчет геометрических, электрических параметров – 20%

Полный расчет устройства (ОЭКП) – 20%

Расчет результирующих характеристик – 10%

Оформление пояснительной записки – 20%

При разработке ОЭКП и У необходимо обращать достаточное внимание на вопросы, касающиеся исследования и применения процессов взаимодействия оптических излучений с веществом для передачи, приема, хранения и отображения информации.

Функционирование большинства оптоэлектронных и квантовых приборов (ОЭКП) немыслимо без приборов управления лазерным излучением во времени и пространстве. Поэтому большое внимание при разработке ОЭКП обращается на вопросы излучения, модуляции его параметров.

Появление малогабаритных передатчиков, приемников, волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) подтолкнуло к появлению и развитию нового научно-технического направления – создание интегрально оптических устройств, необходимых при работе быстродействующих устройств оптической обработки больших объемов информации.

В ВОСС (волоконно-оптическая система связи) интегрально-оптические устройства осуществляют пространственно-временное преобразование оптических сигналов, их частотную селекцию, а также уплотнение сигналов в оптических каналах.

Следует отметить, что на основе полупроводниковых лазеров можно создать все основные элементы оптоэлектронных вычислительных машин: ячейки памяти, устройства для записи и считывания информации, логические элементы.

2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Согласно определению, данному в образовательном стандарте ВУЗА ОС ТУСУР 2002 г., *курсовая работа (КР) – учебная работа, содержащая результаты теоретических и (или) практических (экспериментальных) исследований по отдельной учебной дисциплине.*

При разработке ОЭКП и У решают ряд задач, связанных с составлением схемы, наилучшим образом удовлетворяющей поставленным требованиям технического задания (ТЗ), с расчетом этой схемы на основании выбранных параметров и режимов работы ее элементов.

Цель курсовой работы по дисциплине ОЭКП и У состоит в закреплении и более глубоком усвоении теоретических знаний по данной дисциплине, а также в приобретении навыков и освоении методов технического расчета при решении конкретных технических задач, связанных с умением объединять науку и

технику, исследовать и применять процессы взаимодействия оптических излучений с веществом для передачи, приема, переработки, хранения и отображения информации.

В процессе самостоятельной работы студента (под руководством преподавателя) решаются следующие задачи:

- развитие навыков самостоятельного поиска и использования справочной литературы (включая источники в Интернет);
- развитие самостоятельности при выборе методов расчета и творческой инициативы при решении конкретных задач;
- получение навыков разработки и закрепление представлений обо всех этапах решения задач;
- усвоение комплекса организационных мер и приемов при выполнении работ большого объема;
- получение навыков разработки и выбора отдельных конкретных устройств, приборов на соответствующие параметры и характеристики;
- ознакомление с процедурой защиты курсовой работы перед комиссией;
- подготовка к выполнению дипломной работы (проекта).

Курсовая работа выполняется по индивидуальным заданиям. В соответствии с заданием должна быть разработана тема, утвержденная заведующим кафедрой. Общее руководство осуществляет преподаватель. За принятые в работе решения, правильность выбранных схемных решений, расчетов, качество подготовки текстовых документов, а также за своевременность подготовки и защиты курсовой работы в целом отвечает студент. В процессе выполнения работы студент должен правильно организовать свой труд, регулярно работать над заданием, проявлять максимум инициативы и самостоятельности в решении поставленных задач.

В настоящее время для целей проектирования ОЭКП и У широко используются ЭВМ с различными пакетами программ. Однако первый этап машинной разработки представляет собой ручной эскизный расчет, дающий приближен-

ное решение поставленной задачи, уточнение которого проводится далее на ЭВМ.

3. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ТЕМЫ КУСОВЫХ РАБОТ

Предлагаемые ниже некоторые темы курсовых работ, определяются программой курса и связаны с предыдущими и последующими дисциплинами. На основе краткой информации, представленной в п.2 следует, что курсовые работы можно представить следующими разделами:

Раздел 1 связан с рассмотрением вопросов, касающихся построения оптических квантовых излучателей и усилителей, расчетом их основных параметров и характеристик. К ним можно отнести следующие темы:

- Оптический квантовый генератор на стекле с примесью ионов Nd^{3+} , работающий в режиме свободной импульсной генерации.
- Оптический квантовый генератор на $Al_2O_3:Cr^{3+}$, работающий в режиме синхронизации мод.
- Оптический квантовый генератор на рубине, работающий в режиме модулированной добротности.
- Волоконнооптический усилитель для систем оптической связи.
- Полупроводниковый излучатель на двойной гетеро структуре для систем оптической связи.
- Передающий модуль на п/п СИД для ВОЛС.
- Дальномер на основе полупроводникового лазера.
- Моделирование параметров полупроводниковых светоизлучающих диодов.
- Моделирование параметров распределенных отражающих структур DFB- и DBR-лазеров.

Раздел 2 включает в себя рассмотрение вопросов, касающихся оптических резонаторов:

- Конфокальный оптический резонатор.

- Моделирование параметров волноводных структур полосковых полупроводниковых лазеров.

Раздел 3 посвящается рассмотрению вопросов, касающихся приемных оптических модулей:

- Приемный модуль на ЛФД для высокоскоростной ВОЛС.
- Приемный модуль на рпн фотодиоде для высокоскоростной ВОЛС.

Раздел 4 касается рассмотрения вопросов, относящихся к приборам управления выходными параметрами передающего модуля:

- Интегральный акустооптический модулятор (АОМ) для систем оптической связи.
- Моделирование основных параметров и характеристик акустооптического изотропного модулятора, работающего в режиме дифракции Рамана-Ната.
- Моделирование основных параметров и характеристик акустооптического изотропного модулятора, работающего в режиме дифракции Брэгга.
- Высокочастотный интегрально-оптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера.

4. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

4.1 Общие сведения

В результате выполнения курсовой работы по ОЭЖП и У студент должен получить представление: о принципах построения различных типов приборов и устройств; о методах анализа, синтеза и оптимизации параметров приборов, систем радио и оптической связи и составляющих их элементов; об использовании методов математического и физического моделирования в процессе исследования и оптимизации параметров отдельных элементов и систем связи в целом; об особенностях передачи различных сигналов по каналам и трактам.

После получения задания студент последовательно выполняет следующие задачи:

- анализ технического задания,
- постановка задачи проектирования,
- обзор литературы по указанной теме,
- выбор и обоснование структурной схемы,
- выбор и обоснование использования программного обеспечения для разработки, расчета основных параметров и характеристик,
- разработка текстовой документации,
- оформление отчета по курсовой работе,
- защита курсовой работы перед комиссией.

4.2. Структура курсовой работы

Курсовая работа должна содержать:

- текстовый документ (ТД);
- графический материал.

Объем текстового документа подготавливаемого студентом в процессе выполнения курсовой работы составляет приблизительно 20-30 страниц машинописного текста формата А4.

Чертежи, входящие в работу, должны строго соответствовать требованиям ЕСКД.

При оформлении курсовой работы следует пользоваться стандартом вуза ОС ТУСУР 6.1-97, где сформулированы правила оформления курсовых и дипломных проектов (работ) [1].

4.3. Общие рекомендации по организации работы

Организация работы по курсовому проектированию со стороны студента заключается в планировании и самоконтроле выполнения КР, во взаимодействии с руководителем проектирования

Планирование работы на среднесрочную перспективу (1-2 недели) имеет смысл вести в письменной форме (или электронной форме), с тем чтобы были очевидны при подведении текущих итогов работы и достижения, и промахи. Это позволяет постоянно чувствовать ритм работы и ее соответствие долговре-

менному плану (КР), корректировать оперативные планы работы на краткосрочную перспективу. Кроме того, такие планы позволят более целенаправленно использовать время еженедельных встреч с руководителем курсовой работы, особенно если итоги работы по этим планам подводятся накануне встреч с руководителем. *При составлении среднесрочных планов следует постоянно учитывать отмеченный выше риск невыполнения КР и пути его минимизации.*

Помните, что “лучшее – враг хорошего”, и не приступайте к переделкам КР и планов ее реализации без крайней необходимости и без наличия требуемого резерва времени и материальных ресурсов. Это, как правило, заканчивается неудачей: старое – уничтожается, новое – не успевают сделать!

При планировании и выполнении работ *не следует спешить*. Поспешные решения могут повлечь за собой ошибки и привести к дополнительным затратам времени. *Ни в коем случае не следует откладывать оформление КР на последний месяц семестра.*

Систематическая работа над оформлением результатов, тщательное планирование и выполнение текущих работ, вынесение наиболее трудоемких работ на первый план в начале разработки создают необходимый деловой настрой, повышают производительность труда и являются залогом успешного и своевременного выполнения и защиты КР.

При защите КР студент не имеет права обосновывать принятые решения ссылками на рекомендации руководителя (обоснования должны быть технически аргументированы!).

Регулярное взаимодействие студента с руководителем курсовой работы позволяет вводить коррективы в планирование работы над КР, нормализовать психологический климат и избегать чрезвычайных ситуаций. Кроме того, оно дает возможность своевременно корректировать ТЗ (в случае необходимости).

Для обеспечения нормальной организации работы на этапе разработки рекомендуется завести рабочую тетрадь(РТ) и постоянно в (РТ) регулярно фиксировать:

- используемые литературные источники,

- краткую информацию по используемым литературным источникам,
- список задач, которые должны быть решены в процессе курсовой работы, основные вопросы, возникающие в процессе работы,
- расчетные формулы, интересные факты, описание функций, модулей и используемых данных,

Выше отмечены основные разделы, лежащие в основе курсовой работы по ОЭКПиУ. *Большое разнообразие возможных тем курсовой работы затрудняет рассмотрение примеров разработки и расчета их основных параметров и характеристик в одном пособии, поэтому в данном пособии будут рассмотрены в основном вопросы, касающиеся приборов и устройств раздела 4.*

5. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

5.1. Структурная схема ОЭКП

На рис.5.1. представлена обобщенная структурная схема, являющаяся основой практически любого оптико-электронного квантового прибора (ОЭКП) [27]. Краткое рассмотрение схемы позволяет показать назначение основных и вспомогательных элементов ОЭКП и систематизировать их по функциональному назначению. Назначение системы накачки 2, получающей энергию от источника питания 1 – обеспечить возбуждение рабочей среды (лазера) 3, создать в ней условия для поддержания неравновесного состояния с инверсией населенностей. Оптический резонатор, представляющий собой систему минимум из двух параллельных друг другу отражателей 4 и 5, является частотно и пространственно-селективным устройством положительной обратной связи, а также в значительной степени определяет и энергетические характеристики лазера. Предельно достижимые частотные, временные и пространственные характеристики излучения получают в ОЭКП с помощью помещенных внутрь резонатора селектора мод 6 и модулятора 7, а также с помощью внешней по отношению к резонатору оптической системы формирования излучения, состоящей из внешнего селектора мод 8, внешнего модулятора (временных характеристик излучения) 9, устройства управления излучением в пространстве 10 (устройства

отклонения луча). Для стабилизации параметров излучения (мощности излучения $P_{\text{вых}}$, его частоты $\nu_{\text{ген}}$, положения оси лазерного луча в пространстве, а также систем автоматической юстировки отражателей резонатора и т.п.) служит устройство 11, функционально связанное с элементами резонатора и источника накачки 2. Для ОЭКП связного, локационного назначения, для технологических ОЭКП необходима взаимная связь между объектом исследований, передающей частью ОЭКП и его информационной частью. Эту связь, чаще всего непосредственно через излучение (прошедшее через объект, отраженное от него и принятое приемной частью ОЭКП 13), осуществляет устройство обработки информации 14 и решающее устройство 15, в котором на основе полученной информации принимается решение об изменении режима работы лазера, об осуществлении требуемого закона сканирования или его изменения, а также о дозировании во времени энергии (мощности), падающей на объект. Этот блок непосредственно связан с элементами передающей части ОЭКП и управляет их работой.

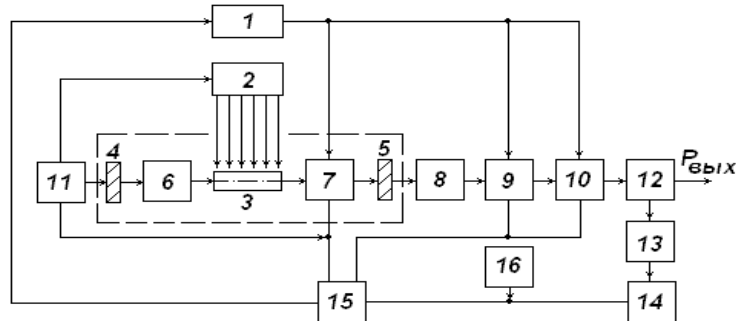


Рис. 5.1. Обобщенная структурная схема ОЭКП

Рассмотренные элементы структурной схемы являются в значительной степени обязательными для большинства ОЭКП независимо от тех задач, которые они призваны решать [27].

Как следует из рисунка 5.1 для ОЭКП связного, локационного назначения, устройство 14 является одним из важнейших.

5.2. Общие сведения об оптических методах обработки информации

Оптические методы обработки информации находят широкое применение при решении многих сложных технических задач (обработка изображений

в телевизионной технике и астронавигации, создание оптических аналоговых и цифровых вычислительных машин, исследования природных ресурсов, в радиолокации и т. д.).

Оптические системы обработки радиосигналов являются специализированными вычислителями, позволяющими получить такие технические характеристики устройств, которые пока еще недостижимы при использовании других средств. Наиболее просто в них в аналоговой форме осуществляются операции перемножения, формирования спектров Фурье, вычисления корреляционных интегралов и некоторые другие преобразования сигналов.

В публикациях, посвященных этим системам, отмечается их предельно высокое быстродействие, широкополосность, двумерность, адаптивность и т. д. В то же время указывается, что существует множество еще не решенных проблем. К их числу относится, в частности, проблема *быстрого ввода в оптическую систему обрабатываемых сигналов*. Устройства, осуществляющие такой ввод, называют *модуляторами света*.

ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ. Фактическим переносчиком данных в *оптической системе обработки информации* является оптическая несущая. Возможна непосредственная модуляция оптической несущей – ее включение/выключение (включение/выключение тока возбуждения или накачки лазерного источника). Однако у этого метода есть ряд существенных недостатков (*нелинейная зависимость мощности излучения от тока; метод не удобен для систем WDM, где несколько источников модулирующих сигналов мультиплексируются для передачи по одной несущей и др.*).

Вместо непосредственной модуляции оптической несущей эффективнее модулировать промежуточную несущую, используя ее для модуляции оптического сигнала. Основное преимущество данного подхода – в применимости стандартных методов и устройств модуляции (амплитудных, частотных, фазовых и комбинированных), разработанных для радиочастотного диапазона. При многоканальной модуляции в системах WDM отдельные входные потоки моду-

лируют свои поднесущие, которые затем мультиплексируются в одну поднесущую, модулирующую оптический сигнал.

Устройства, осуществляющие модуляцию – модуляторы. В соответствии с используемыми физическими принципами и механизмами воздействия на оптическую несущую, модуляторы можно разделить на акустооптические и электрооптические.

Существует два вида модуляции: внешняя - модулятор находится вне резонатора и осуществляет модуляцию выходного излучения лазера и внутренняя когда модулятор находится внутри резонатора, изменяя его свойства (например, добротность).

При обработке радиосигналов в настоящее время одним из наилучших устройств ввода являются *акустооптические модуляторы*. Их использование позволяет создавать оптические вычислители, работающие в реальном времени, которые называют акустооптическими устройствами (АОУ).

Создание АОУ обработки радиосигналов требует решения ряда сложных научно-технических задач. ***К ним относятся проектирование АОМ и разработка специализированных оптических систем и преобразователей выходного оптического сигнала в форму, удобную для дальнейшей, в том числе и машинной, обработки.***

Расчет АОМ (параметров и характеристик) является неотъемлемой частью проектирования устройств управления выходными параметрами лазерного излучения. В известной учебной и научной литературе материал, посвященный этой проблеме, не всегда представлен в удобном для проектирования виде. К тому же в теории модуляторов нет достаточно обоснованного доказательства преимущества использования того либо иного схемного решения при разработке конкретного акустооптического модулятора. В этой связи в данном пособии собраны наиболее известные схемные решения построения АОМ, а соотношения для расчетов основных параметров и характеристик даны без выводов. Ссылки на литературу позволяют найти, при необходимости, доказательства справедливости приведенных соотношений.

5.3. Структура систем оптической обработки сигналов

Одним из перспективных направлений применения оптических методов является обработка радиолокационных сигналов. Быстродействие РЛС с системой оптической обработки информации ($10^{12} \dots 10^{14}$ бит/с), РЛС с традиционной электронной обрабатывающей системой ($10^6 \dots 10^8$ бит/с).

Структурная схема системы оптической обработки сигналов приведена на рисунке 5.2. Для выполнения заданного алгоритма обработки на аналоговое оптическое вычислительное устройство поступают оптические сигналы, в которых закодирована информация, выдаваемая источником информации. Преобразование электрических сигналов в оптические выполняется источником света и преобразователем входных сигналов в оптический аналог. После выполнения заданного алгоритма обработки аналоговое оптическое вычислительное устройство формирует на выходе системы распределения амплитуд и фаз света, в которых содержатся результаты обработки сигналов, поступающих от источника информации. Преобразователь выходных сигналов измеряет параметры световых сигналов, поступающих на его выход, и выдает получателю информации конечный результат обработки в необходимом виде (как правило, в виде электрических сигналов).

В качестве устройств ввода применяются различные типы пространственно-временных модуляторов света, принцип работы которых основан на взаимодействии света с динамическими неоднородностями, реализуемыми различными физическими эффектами в твердых и жидких средах. Для модуляции света используются электро- и магнитооптический эффекты, явления фотоупругости и др. На основе явления фотоупругости созданы акустооптические модуляторы (АОМ), которые находят широкое применение в оптических системах, осуществляющих одно- и многоканальный спектральный анализ, в акустооптических фильтрах, акустооптических устройствах по обработке сигналов антенных решеток, корреляторах радиолокационных сигналов и др.[6].

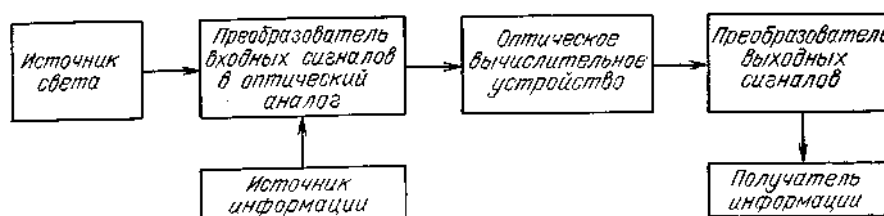


Рис. 5.2. Структурная схема системы оптической обработки сигналов

5.4. Акустооптические модуляторы

АОМ – приборы, управляющие интенсивностью световых пучков на основе перераспределения световой энергии между проходящим и дифрагированным светом. Обычно используется модуляция дифрагированного света, т. к. 100%-ная модуляция проходящего излучения требует значительных акустических мощностей. Акустооптический модулятор представляет собой акустооптическую ячейку (АОЯ), в которой распространяется амплитудно-модулированная звуковая волна. Падающий на АОЯ свет частично дифрагирует, и отклоненный луч принимается фотоприемным устройством.

Акустооптические модуляторы при максимальной простоте конструкций позволяют осуществлять такие сложные операции, как параллельная обработка информации в акустооптических процессорах.

5.4.1. Классификация АОМ света

На основе явления фотоупругости созданы акустооптические модуляторы света двух типов – двулучепреломляющие (см. рис.5.3) и дифракционные (см. рис. 5.4). Очевидно, физический механизм и тех, и других одинаков, а различается лишь описание, которое связано с частотными параметрами модуляции.

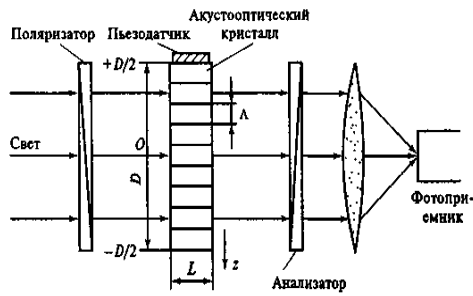


Рис. 5.3. Акустооптический модулятор двулучепреломляющего типа

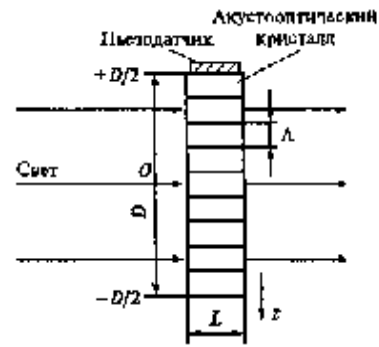


Рис. 5.4. Акустооптический модулятор дифракционного типа

С помощью акустических волн можно управлять любыми параметрами световой волны: амплитудой, фазой, частотой, поляризацией. В соответствии с этим возможны различные виды акустооптических модуляторов. Более полная классификация АОМ приведена ниже.

Традиционно дифракционные модуляторы делят на две группы:

- раман-натовские (или модуляторы Дебая-Сирса) и
- брэгговские.

Раман-натовские модуляторы работают на частотах ультразвука, не превышающих обычно 100 МГц и используют раман-натовский режим дифракции. При изменении амплитуды упругой волны модулируется интенсивность всех максимумов. Экран (8), задерживает непродифрагировавший свет (рис. 5.5,а). Используется и другая схема модулятора, где через отверстие в экране пропускается нулевой дифракционный максимум, являющийся рабочим.

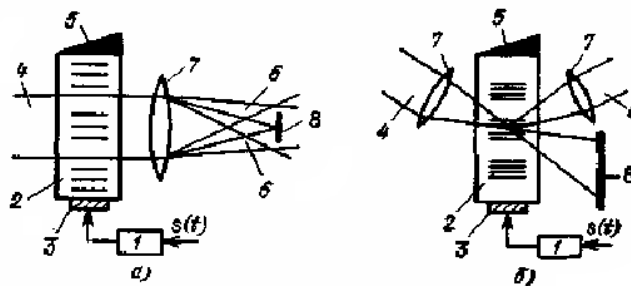


Рис. 5.5. Принципиальные схемы модуляторов, работающих в раман-натовском (а) и брэгговском (б) режимах дифракции

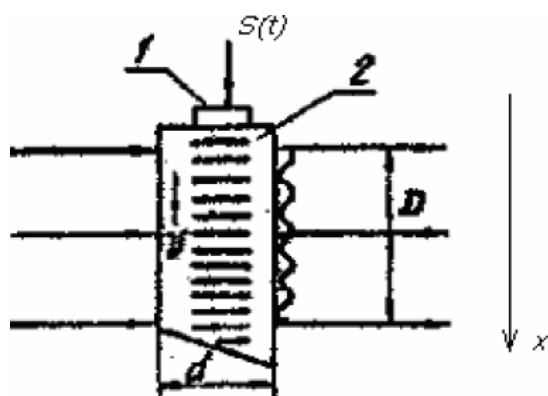


Рис.5. 6. Акустооптический
модулятор света

Общим недостатком раман-натовских модуляторов является неширокая полоса модуляции Δf .

Стремление увеличить Δf автоматически приводит к брэгговскому режиму дифракции. Отличительная особенность схемы брэгговского модулятора заключается лишь в том, что угол падения выбирается равным углу Брэгга (рис. 5.5,б). В качестве

рабочих можно использовать максимумы как первого, так и нулевого порядков. Однако следует учитывать, что в первом случае интенсивность света изменяется синфазно с амплитудой упругой волны, а во втором - модуляция имеет противофазный характер [7].

Различные виды модуляции требуют разного выполнения преобразователей. В акустооптических волоконных модуляторах света задача пьезообразователей – создать в тонком одно- или многомодовом световоде такие деформации, которые привели бы либо: к однородному по сечению волокна изменению фазовой скорости света (для фазовой модуляции прошедшего света), либо к изменению отражения (или утечки) определенной оптической моды (для амплитудной модуляции прошедшего света), либо, наконец, к введению искусственной анизотропии волокна для управления поляризацией излучения. **Основное отличие пространственных АОМ от электрооптических пространственных модуляторов состоит в том, что в первом – выходной сигнал оказывается промодулированным также и во времени.**

Наибольшее применение в реальных устройствах находят временные модуляторы интенсивности света с бегущей акустической волной в изотропных средах [11].

5.4.2. Принцип действия АОМ

На рисунке 5.6 схематично представлено устройство АОМ, принцип действия которого основан на явлении дифракции света на ультразвуковых колебаниях. Модулятор света работает следующим образом. Входной сигнал $S(t)$ с помощью пьезоэлектрического преобразователя (1) возбуждает в прозрачном для света образце (2) упругие колебания, распространяющиеся в нем со скоростью v_{duct} . В силу конечности v_{duct} колебания, возникшие у поверхности, на которой расположен преобразователь ($x=0$), в момент времени t достигнут точки с координатой x внутри образца с некоторым запаздыванием, равным $t_0 = \frac{x}{v_{duct}}$. Поэтому величина колебаний в различных точках образца для фиксированного момента времени будет пропорциональна $S(t - \frac{x}{v_{duct}})$. Таким образом, зависимость величины колебаний от координаты x будет повторять временную зависимость $S(t)$ входного сигнала. [16].

5.4.3. Качественное описание явлений дифракции Рамана-Ната и Брэгга

Физическая картина дифракции света на упругой волне может быть описана следующим образом. Распространение акустической волны в упругооптической среде сопровождается появлением в этой среде бегущей периодической последовательности изменений показателя преломления. Если период этой последовательности меньше ширины светового пучка, то в среде происходит дифракция света на бегущей со скоростью звука фазовой дифракционной решетке. Характер этой дифракции существенно зависит от длины области взаимодействия света и звука $l_{electr} = L$ (см. рис.5.7). При достаточно малом l_{electr} дифракционная решетка может рассматриваться как плоская. В этом случае направления на дифракционные максимумы определяются, как в обычной плоской дифракционной решетке:

$$\sin \theta_m = \sin \theta_0 + m \frac{\lambda_{duct}}{\Lambda_{duct}} \quad (5.1)$$

где θ_m – направление на m -й дифракционный максимум ($m=0, \pm 1, \dots$);

θ_0 – угол падения света.

При дифракции Рамана-Ната (малом I_{electr}) можно считать, что световой луч проходит через область взаимодействия прямолинейно, это эквивалентно предположению о чисто фазовой модуляции света при его взаимодействии с упругой волной. Разлагая фазомодулированную волну на выходе из области взаимодействия в пространственно-угловой спектр, можно получить картину с большим числом дифракционных максимумов (рис.5.7,а).

Существенно иной характер имеет дифракция света на ультразвуке при большом I_{electr} . Дифракционная решетка в этом случае является трехмерной, и при анализе дифракционной картины, необходимо учитывать *фазовые соотношения между волнами различных дифракционных максимумов*. Такая дифракция происходит только при определенном угле падения света на ультразвуковой столб, удовлетворяющем так называемому условию Вульфа-Брэгга. Этот режим дифракции носит название дифракции Брэгга. Для нее характерно наличие лишь одного бокового дифракционного максимума (рис.5.7,б).

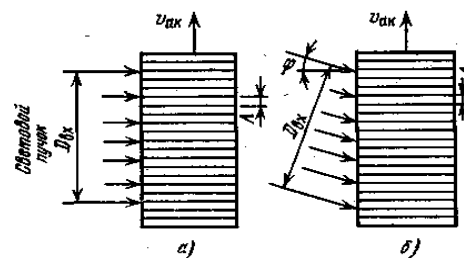
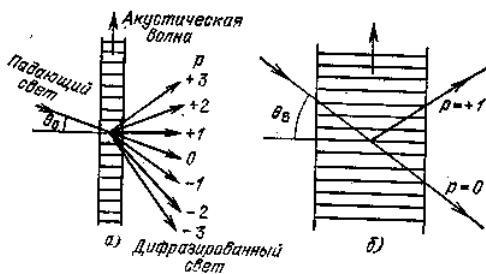


Рис.5.7. Схема дифракции света: а – дифракция Рамана-Ната; б – дифракция Брэгга. Рис.5.8. Ультразвуковые – дифракционные дефлекторы (модуляторы): а – раман-натовский, б – брэгговский.

Для реальных АОМ существует ограничение, связанное с диаметром светового пучка D , влияющее на сам процесс возникновения дифракции. Это можно назвать **условием возникновения дифракции: $D \gg \lambda$** . Методы модуляции

можно разделить (рис.5.8) на дифракционные раман-наставские ($D \gg \Lambda, \theta_0 = 0$) и дифракционные брэгговские ($D \gg \Lambda, \theta_0 = \theta_{br}, l_{electr} \geq l_{electr0}$) [8].

Следует иметь в виду, что поляризация дифрагированного света зависит от того, на каких акустических волнах, продольных или поперечных, осуществляется дифракция.

5.4.4. Основные параметры и характеристики акустооптических модуляторов

Для описания свойств всех типов акустооптических модуляторов используются следующие основные параметры и характеристики:

- область модулируемых акустических частот Δf (в первую очередь она определяется полосой преобразователя, условиями согласования преобразователя с ВЧ генератором, но ограничения полосы модуляции, могут быть обусловлены и особенностями акустооптического взаимодействия;
- область модулируемых световых частот, характеризуемая пропусканием среды в интервале длин волн $\Delta \lambda$;
- эффективность дифракции η , равная отношению интенсивностей дифрагированного и недифрагированного падающего света;
- частотная характеристика эффективности дифракции;
- оптические потери, описываемые коэффициентом поглощения α_{opt} ;
- глубина модуляции m ;
- контраст K_n ;
- быстродействие (или время переключения) t_{sw} , определяемое выражением

$$t_{sw} = \frac{D}{v_{duct} \cdot \cos(\theta_0)}, \quad (5.2)$$

где θ_0 – угол падения света на АОЯ.

На практике модулируемый пучок приходится фокусировать в ячейку, причем наибольшая полоса модуляции получается, когда перетяжка пучка (наименьший размер пучка – *апертура*) находится в центре области взаимодействия. *Минимальная апертура пучка определяется условием существования дифракции: $D > \lambda$* . Учитывая это, получаем ограничение на полосу модуляции: $\Delta f < f_0$. Отсюда следует, что наиболее эффективный путь повышения быстродействия – это увеличение частоты несущих колебаний, то есть f_0 ;

- степень нелинейности δ , эксплуатационные характеристики (отсутствие усталости, механическая прочность, стоимость и т.д.);
- зависимость произведения полосы на эффективность модуляции W от параметра Гордона G_0 (выражение для G_0 дано ниже).

Типичная зависимость $W(G_0)$ приведена на рисунке 5.9.

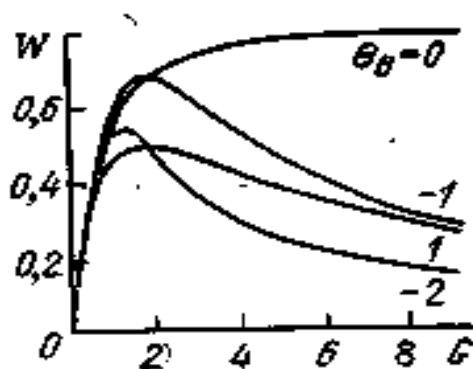


Рис.5.9. Зависимость произведения полосы на эффективность модуляции от параметра Гордона

Для оценки акустооптической эффективности среды (материала) введён коэффициент акустооптического качества M_2

$$M_2 = \frac{n_{duct}^6 \cdot P_{duct}^2}{\rho_{duct} \cdot v_{duct}^3} \quad (5.3)$$

где n_{duct} – показатель преломления среды звукопровода;

P_{duct} – упругооптический коэффициент среды звукопровода;

ρ_{duct} – плотность материала звукопровода, кг/м³;

v_{duct} – скорость распространения акустической волны в материале звукопровода, м/с.

Данный коэффициент принято измерять в относительных единицах: по отношению к коэффициенту акустооптического качества плавленого кварца $M_{2c} = 1,56 \cdot 10^{-18} \text{ c}^3 / \text{z}$, найденного при дифракции света на продольной звуковой волне, когда световая волна поляризована в плоскости взаимодействия. Тогда относительный коэффициент акустооптического качества выражается формулой

$$M_{2r} = \frac{n_{duct}^6 \cdot P_{duct}^2}{\rho_{duct} \cdot v_{duct}^3 \cdot M_{2c}} \quad (5.4)$$

- Динамический диапазон АОМ.
- Управляющая электрическая мощность или значение потребляемой электрической мощности [17].

5.4.5. Оптимизация параметров модулирующей акустооптической ячейки

Помимо полосы модуляции Δf , другой важной характеристикой модулятора является потребляемая акустическая мощность P_{ad} , которая определяет эффективность дифракции η . Между этими характеристиками существует противоречивая связь: Учитывая это обстоятельство, обычно оптимизируют параметры модулирующей ячейки по максимуму отношения полосы модуляции к потребляемой акустической мощности P_{ad} (при фиксированном η) или, что то же самое, по максимуму произведения полосы на эффективность модуляции при фиксированном P_{ad} . Значение G_{op} зависит от геометрии взаимодействия. При изотропной дифракции Брэгга $G_{op} = -1,85$. Отсюда получаем условие согласования углов расходимости светового φ_l и звукового φ_s пучков: $\varphi_l = 1,85 \varphi_s$.

Графики рис. 5.9 позволяют рассчитать оптимальные параметры модулирующей ячейки.

При оптимальном выборе параметров модулятора потребляемая мощность не зависит от геометрических размеров преобразователя и его центральной частоты, а определяется главным образом полосой и эффективностью мо-

дуляции. Поэтому при численных расчетах удобно пользоваться удельной мощностью:

$$P_{aD} = \frac{P_{ad}}{\Delta f \cdot \eta} \quad (5.5)$$

Если параметры D и G_0 фиксированы, то удельная мощность определяется только свойствами материала ячейки, коэффициентом качества M_2 (см. таб.В1, В2 Приложения В).

Оценивая потребляемую модулятором мощность, следует также учитывать потери на преобразование электрического сигнала в акустическую волну.

Следует иметь в виду, что зависимость полосы модуляции от оптимальных размеров преобразователя приводит к расходимости ультразвуковой волны и изменению плотности акустической мощности, что затрудняет юстировку светового пучка [17].

5.5. Структурная схема АОМ и конструктивные составляющие

Практическая реализация потенциальных возможностей АОУ обработки радиосигналов в значительной степени определяется характеристиками используемых в них модуляторов. На рис. 5.10 приведена общая классификация АОМ.

При разработке АОМ можно выделить следующие основные аспекты акустооптического взаимодействия:

- преобразование электромагнитной волны в акустическую;
- возбуждение пьезопреобразователя АОМ генератором электрического сигнала;
- обеспечение эксплуатационной устойчивости к дестабилизирующим факторам;
- технология, синтез новых материалов; конструирование.

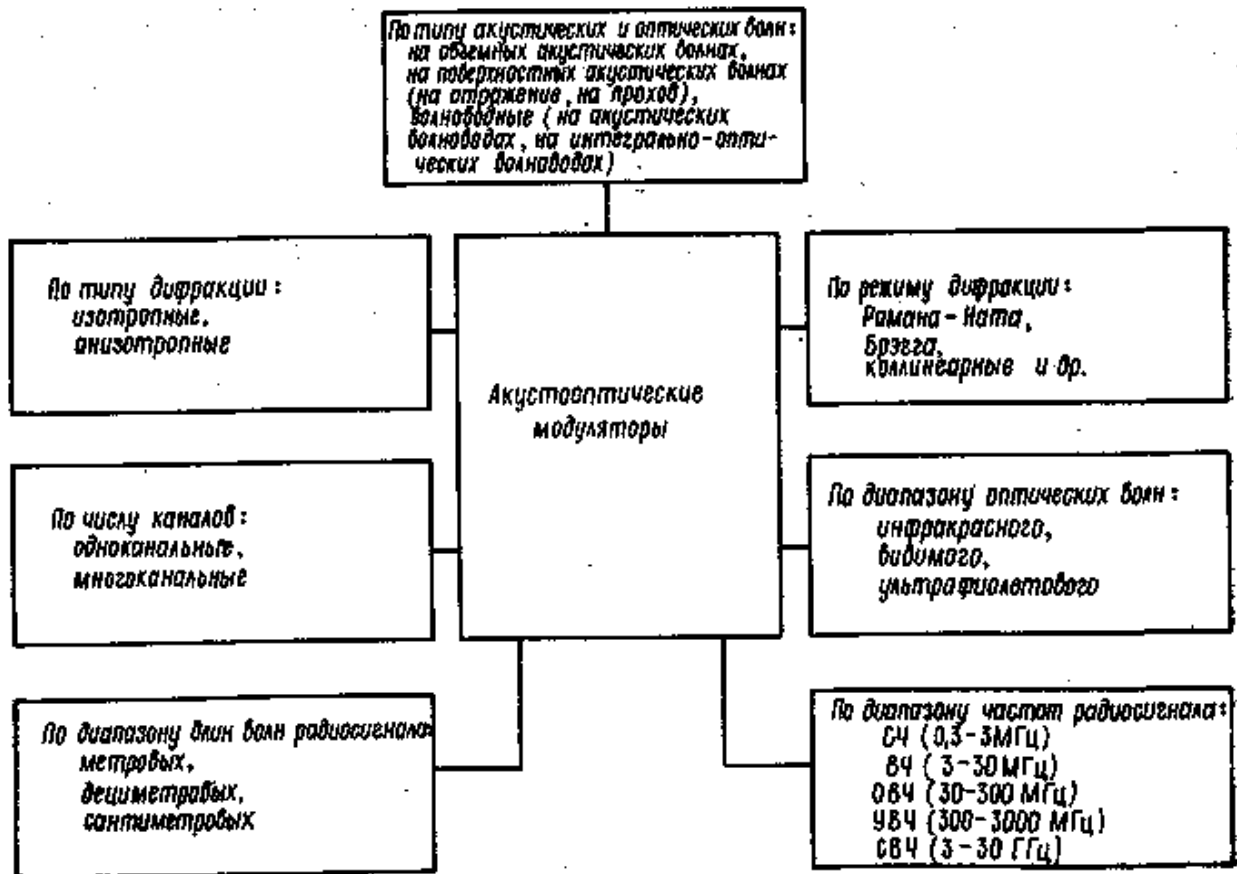


Рис. 5.10. Классификация акустооптических модуляторов

С точки зрения современных концепций разработки технических устройств, разработка АОМ с требуемыми характеристиками является многокритериальной, многофакторной оптимизационной задачей. При этом становятся важными вопросы однозначной терминологии основных конструктивных составляющих изделия, установления общего структурного и классификационного уровня, способствующие оптимизации и автоматизации проектно-конструкторских работ на основе современных средств вычислительной техники, повышению степени унификации элементов, узлов, улучшению их взаимозаменяемости, ремонтпригодности.

На рис. 5.11 изображена детализированная структурная схема АОМ, в основу построения которой положен функционально-узловой принцип деления на структурные и конструктивные составляющие. Отдельные функциональные узлы могут изготавливаться и поставляться разными специализированными предприятиями и производствами.

В составе АОМ целесообразно выделить следующие функциональные узлы: акустооптический узел (АУ), узел возбуждения пьезопреобразователя (УВП), узлы обеспечения эксплуатационной стабильности (УЭС).

Определяющим большинство важнейших технических характеристик АОМ является акустооптический узел. Он состоит из светозвукопровода СЗП,

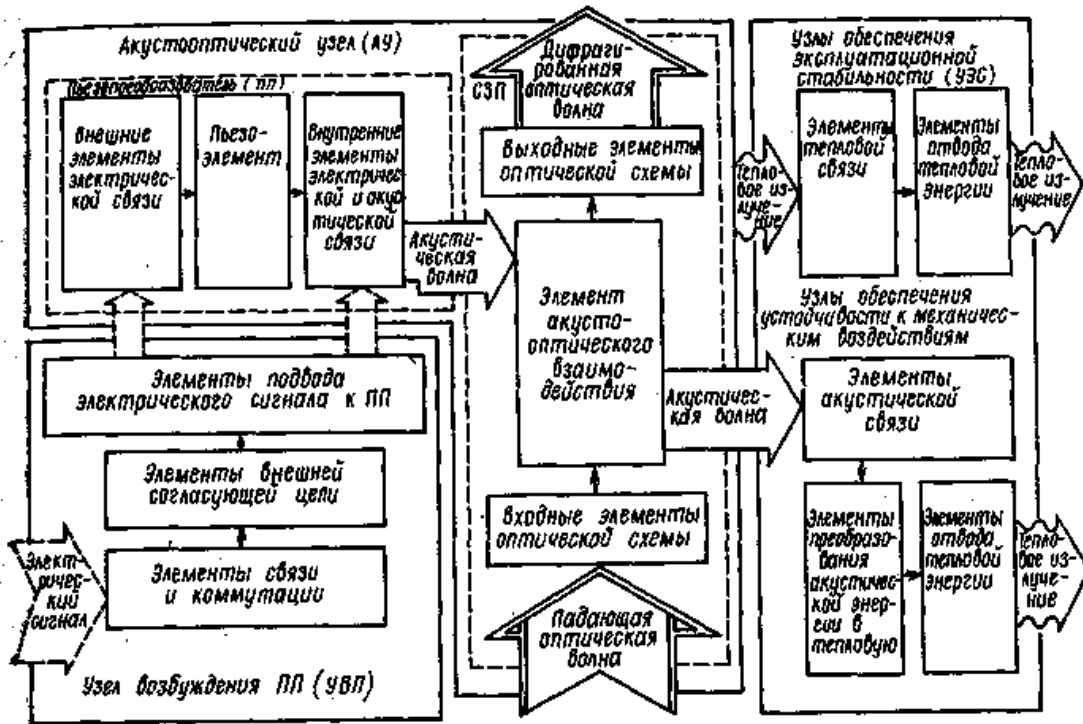


Рис. 5.11. Структурная схема акустооптического модулятора

пьезопреобразователя ПП и акустического поглотителя.

Светозвукопровод включает элементы акустической схемы, входной и выходной оптических схем.

Пьезопреобразователь состоит из пьезоэлектрического элемента и элементов связи. Последние делятся на элементы, осуществляющие акустический контакт с СЗП, и элементы, служащие для подвода электрической энергии. Возбуждение ПП АОМ осуществляется устройством, состоящим из элементов подвода электрической энергии, электрического согласования с генератором сигнала и коммутации с электронными блоками. В настоящее время существует несколько методов согласования ПП с генератором сигнала.

Акустический поглотитель выполняет функции вывода акустической энергии из СЗП и состоит из элементов преобразования акустической энергии в тепловую и вывода ее за пределы лазерного модуляционного устройства.

5.5.1. Области применения акустооптического эффекта

На основе **АОЯ** реализуются следующие устройства:

- спектроанализатор, коррелятор радиосигналов, спектрометр оптического излучения, перестраиваемый акустооптический фильтр, акустооптический дефлектор (является базовым элементом лазерного проектора), акустооптический процессор, акустооптический
- модулятор, преобразователь частоты, анализатор физического состава материала (при использовании волноводного АОМ).

Областями применения АОМ являются использование их:

- в качестве внешнего модулятора в системах WDM (до 2,5 Гбит/с),
- в качестве формирователя телевизионной строки в видеопроекционных технологиях,
- в тех же устройствах или экспериментальных установках, где используются электрооптические модуляторы (ЭОМ), конкурируя с ними.

5.5.2. Преобразователь объёмных акустических волн

Общие сведения о преобразователе. Пьезоэлектрические преобразователи, служащие для взаимного преобразования электрической и акустической энергии, являются основными элементами подавляющего большинства радиоэлектронных устройств, основанных на использовании акустических волн (такие устройства в настоящее время называются акустоэлектронными). Такие характеристики преобразователей как: *основная частота, ширина полосы пропускания и величина потерь преобразования* существенным образом определяют параметры данных устройств в целом [15].

Виды акустических волн в изотропном теле. На рисунке 5.12а изображено распространение объёмной акустической волны, у которой смещения частиц перпендикулярны направлению распространения волны. Такие волны называют поперечными (иногда сдвиговыми).

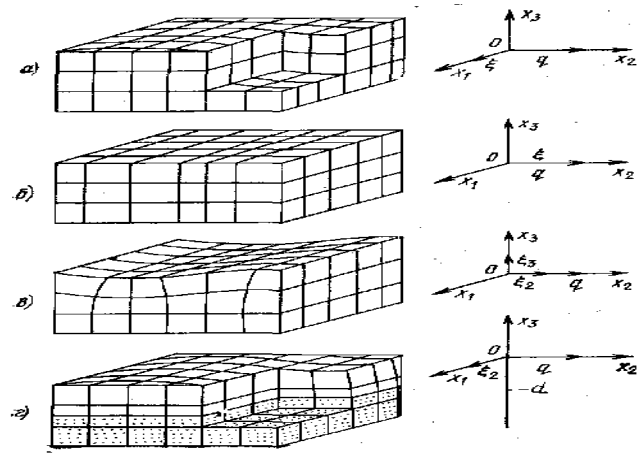


Рис. 5.12 – Основные типы акустических волн в изотропном твёрдом теле. а – поперечная объёмная волна; б – продольная объёмная волна; в – поверхностная волна Релея; г – волна Лява; ξ – вектор смещения; q – вектор волнового числа; d – толщина слоя

На рисунке 5.12б смещения частиц волны параллельны направлению распространения и такие волны принято называть продольными (реже волнами сжатия).

5.5.3. Возбуждение объёмных акустических волн

Широко распространенный и эффективный способ возбуждения (приема) объёмных волн состоит в использовании пьезоэлектрических полуволновых слоев (пластин) с электродами, находящимися в акустическом контакте со звукопроводом. В основе этого метода лежит использование для излучения акустических волн обратного пьезоэффекта (деформации пластины под действием электрического поля, приложенного к электродам), а для приема – прямого пьезоэффекта (возникновение электрического заряда на электродах деформированной пьезоэлектрической пластины).

Устройство преобразователя схематически показано на рис. 5.13. Пьезоэлектрический слой 2 толщиной d с электродами 1 и 3 акустически связан со звуководом 4 и тыльной нагрузкой 6 через промежуточные слои 5. При приложении к электродам внешнего переменного электрического напряжения U в пьезоэлектрическом слое, в зависимости от его кристаллографической ориентации, возникают колебания сдвига или сжатия – растяжения по толщине. В результате этого в звуководе возбуждаются соответственно сдвиговые (поперечные) или продольные объемные акустические волны. *Эффективность*

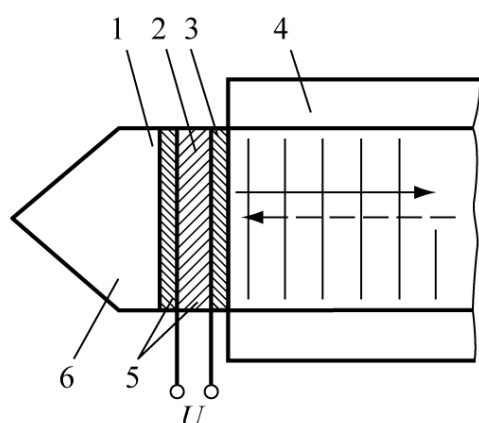


Рис.5.13. Структура резонансного преобразователя объемных волн

взаимного преобразования электрической энергии в акустическую достигает максимума на частоте основного акустического резонанса и на нечетных высших гармониках.

В зависимости от электрофизических параметров используемых пьезоэлектриков, пьезопреобразователи можно условно подразделить на пьезодиэлектрические и пьезополупроводниковые.

Основные параметры и характеристики преобразователей объемных акустических волн. Для описания свойств всех типов преобразователей акустических волн используются следующие основные характеристики:

1. *Потери преобразования* – выраженные в децибелах (отношение электрической мощности P_p , которую генератор может выделить в согласованную нагрузку, к мощности акустической волны P_u , излучаемой преобразователем, подключенным к этому генератору):

$$ПП = 10 \lg \left(\frac{P_p}{P_u} \right).$$

Величину P_p^0 часто называют располагаемой мощностью генератора. При излучении преобразователем нескольких типов акустических волн, преобразование каждой описывается своей собственной величиной ПП.

2. Частотная зависимость потерь преобразования (рис.5. 14).

3. Минимальная величина потерь преобразования ПП_M .

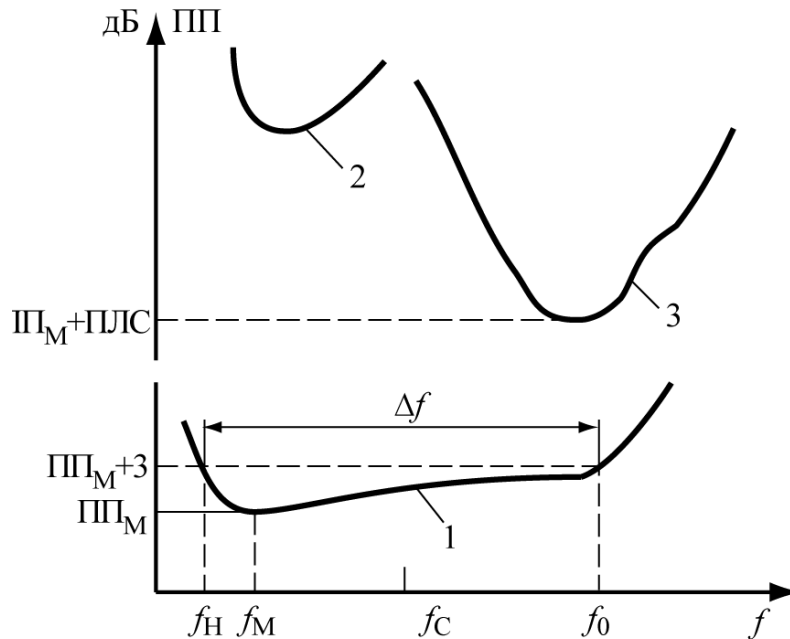


Рис.5.14. Типичная форма частотных зависимостей потерь преобразования основного (1) и неосновных (2 и 3) типов излучаемых акустических волн

4. Частота минимума ПП - f_M .

5. Ширина полосы пропускания Δf – область частот вблизи f_M , в пределах которой величина ПП увеличивается по сравнению с ПП_M не более чем на определенную величину (обычно на 3 дБ), $\Delta f = f_0 - f_H$.

6. Подавление ложных (неосновных) сигналов (ПЛС) – выраженное в децибелах, отношение максимальной величины полезно используемого сигнала к наибольшему из неосновных сигналов в интересующем диапазоне частот.

7. Относительная ширина полосы пропускания $\Delta f/f_C$ – выраженная в процентах. $f_C = 0,5(f_B + f_H)$ - средняя частота пропускания [15].

8. Частотная зависимость входного полного электрического сопротивления преобразователя $z_{ex}^2 = \text{Re}(z_{ex}^2) + \text{Im}(z_{ex}^2)$, где $\text{Re}(z_{ex}^2)$ и $\text{Im}(z_{ex}^2)$ – активная и реактивная составляющие полного сопротивления.

Согласование пьезопреобразователя с трактом управляющего сигнала. Затухание звука в материале ограничивает верхние частоты большинства акустооптических устройств.

Условия Брэгга не позволяют использовать частоты ниже десятков мегагерц. Полоса частот акустооптических устройств, не больше октавы, поскольку при более широкой полосе в области углов, сканируемых излучением, дифрагировавшим в первый порядок, оказывается излучение из второго порядка дифракции, создающее помехи. *Задачей согласующей цепочки является обеспечение постоянной величины мощности акустической волны в звукопроводе во всем диапазоне рабочих частот.* Пьезопреобразователь, для электрического сигнала, является нагрузкой состоящей из параллельно включенной емкости и активного сопротивления. Активная часть этой нагрузки, кроме потерь энергии в пьезопреобразователе и связующих его со звукопроводом слоях, характеризует преобразование электрической энергии в звуковую.

Существует несколько методов расчёта согласующих цепочек. Наиболее простой и наглядный способ согласования пьезопреобразователя с высокочастотным трактом основан на использовании немонотонного характера изменения эквивалентной емкости пьезопреобразователя вблизи частоты резонанса (рис. 5.15).

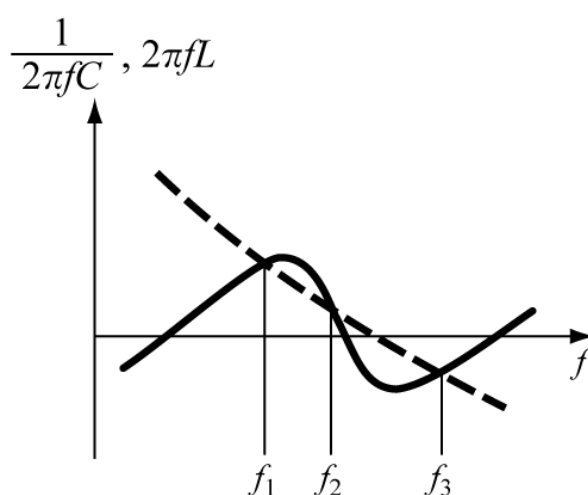


Рис.5.15. Зависимость эквивалентной реактивности пьезопреобразователя $1/(2\pi f C)$ и шунтирующей индуктивности $2\pi f L$ от частоты f вблизи резонанса:

- - - - - реактивность шунтирующей индуктивности

Из рисунка 5.15 следует, что способ согласования, заключается в выборе такой шунтирующей индуктивности L , чтобы емкость пьезопреобразователя была бы скомпенсирована в трех точках диапазона f_1, f_2, f_3 . Полученное активное сопротивление трансформируется к сопротивлению высокочастотного тракта.

Схема согласования, пригодная для практического применения в диапазоне частот до 200 МГц, показана на рис.5.16а.

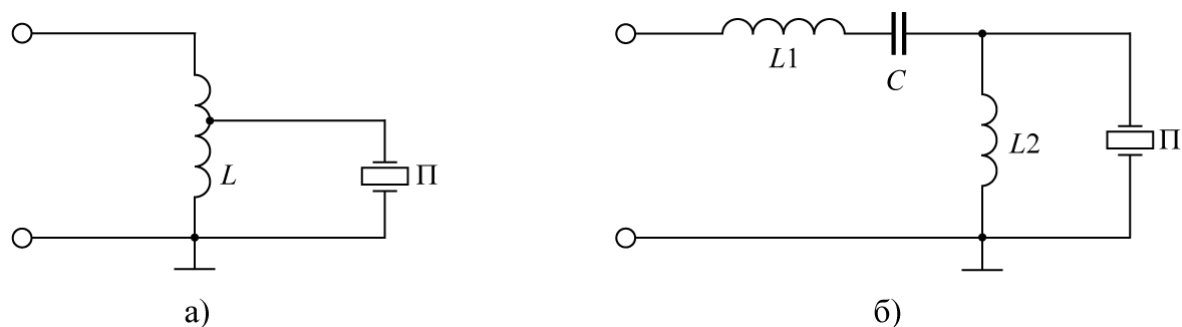


Рис.5.16. Типичные согласующие цепочки в акустооптических устройствах:
а – трансформаторная схема согласования; б – согласующая цепочка акусто-оптического дефлектора на молибдате свинца

Ширина полосы частот согласования определяется, грубо говоря, величиной f_3-f_1 , которая, в свою очередь, растет с увеличением коэффициента электромеханической связи пьезопреобразователя и с уменьшением различия акустических импедансов пьезопреобразователя и звукопровода. Применение согласующей цепочки, показанной на рис.5.16,б, обеспечивает компенсацию реактивности в большем числе точек и, значительно, расширяет полосу пьезопреобразователя.

Знание потенциальных возможностей того или иного метода согласования играет большую роль в процессе проектирования и разработки АОМ, принятия оптимальных конструкторско-технологических решений [14].

В заключении следует отметить, что на основе проведенного краткого обзора можно определить следующие направления работы:

1. Создать математическую модель дифракционного изотропного АОМ бегущей волны для двух режимов дифракции: Рамана –Ната и Брэгга; определить геометрические размеры АОЯ.

2. Провести численное моделирование параметров и характеристик АОМ для материалов (см. Приложения В, Г, Д); рассмотреть возможность учёта агрегатного состояния звукопровода: жидкость или твёрдое тело.

6. Теоретическая часть

6.1. Математическая модель преобразователя объёмных акустических волн

Приближения, используемые в математической модели преобразователя. Для описания процессов распространения акустических волн в диапазоне частот, используемых в современных акустооптических устройствах, можно ограничиться:

1. Феноменологическим приближением, при котором можно пренебречь дискретностью атомной структуры и рассматривать твёрдое тело как непрерывную сплошную среду, поскольку длины акустических волн даже на частотах порядка 10 ГГц, по крайней мере, в 100 раз превышают межатомные расстояния [15].

2. Считать, что распространение объёмных акустических волн происходит в ограниченном однородном изотропном теле.

3. В реальных акустооптических устройствах фронт волны ограничен в поперечных направлениях и ограничены линейные размеры звукопровода.

Это справедливо тогда, когда основная часть мощности расходящейся акустической волны (обычно в пределах главного лепестка диаграммы направленности), проходя весь рабочий участок траектории, не попадет на боковые грани звукопровода. При этом звукопровод можно считать бесконечным (в поперечном направлении). В противном случае появляются отражения от боковых границ, приводящие к появлению в устройстве ложных сигналов. Этого можно избежать выбором поперечных размеров, выполнением рифлений или

нанесением поглотителей на боковые грани звукопровода. При расчетах обычно можно не учитывать ограниченность поперечных размеров звукопровода.

Ограниченность продольных размеров звукопровода приводит к появлению волн, отраженных от границ (в результате часть акустической мощности теряется). Отражением на границе раздела сред можно пренебречь, если на конце звукопровода поместить поглотитель.

3. Можно пренебречь потерями акустической мощности в изотропной среде без поглощения из-за дифракционного расширения фронта волны, так как граница между зонами Френеля и Фраунгофера расположена на достаточно большом расстоянии [11].

4. Потерями световой мощности из-за дифракционной расходимости можно пренебречь, так как расстояние от источника излучения до АОЯ мало по сравнению с длиной когерентности лазера.

5. При нормальном падении акустической волны на границу раздела двух сред, рассматриваемая модель (задача) является одномерной.

6. Границы между элементами преобразователя и сами элементы плоско-параллельными и однородными по свойствам.

7. Как отмечалось выше, поперечные размеры излучателей и приемников, из соображений уменьшения дифракционной расходимости акустической волны, выбирают большими по сравнению с длиной волны, в то же время их толщина сравнима с половиной длины волны.

8. Считать, что существует полное электрическое согласование между радиогенератором и пьезопреобразователем.

9. Считать потери акустической мощности, в тонком промежуточном слое электрода, пренебрежимо малыми (т.к.толщина слоя $\sim 0,01$ мкм).

6.2. Расчетные соотношения

6.2.1. Расчёт волнового числа и длин волн акустической волны в среде

Длина акустической волны в пьезослое рассчитывается по формуле

$$\Lambda_{piezo} = \frac{v_{piezo}}{f} = \frac{c}{f \cdot n_{piezo}}, \quad (6.1)$$

где c – скорость света в вакууме, равная $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;

f - частота электрического сигнала, на пьезопреобразователе, Гц;

n_{piezo} - показатель преломления пьезопреобразователя,

v_{piezo} - скорость распространения акустической волны в пьезопреобразователе, м/с.

Длина акустической волны в промежуточном слое рассчитывается по формуле

$$\Lambda_{slice} = \frac{c}{f \cdot n_{slice}}, \quad (6.2)$$

где n_{slice} – показатель преломления промежуточного слоя.

Длина акустической волны в звукопроводе рассчитывается по формуле

$$\Lambda_{duct} = \frac{c}{f \cdot n_{duct}}, \quad (6.3)$$

где n_{duct} - показатель преломления звукопровода.

Волновое число акустической волны в пьезопреобразователе вычисляется по формуле

$$K_{piezo} = \frac{2\pi}{\Lambda_{piezo}}, \quad (6.4)$$

Волновое число акустической волны в промежуточном слое определяются выражением

$$K_{slice} = \frac{2\pi}{\Lambda_{slice}}, \quad (6.5)$$

6.2.2. Расчёт площадей слоёв

Эффективная площадь поперечного сечения промежуточного слоя определяется выражением

$$S_{slice\ ef} = b_{piezo} \cdot l_{piezo}, \quad (6.6)$$

где b_{piezo} – ширина пьезопреобразователя, м; l_{piezo} – длина пьезопреобразователя, м.

Эффективная площадь первого электрода вычисляется по формуле

$$S_{electr\ ef} = b_{electr} \cdot l_{electr}, \quad (6.7)$$

где b_{electr} – ширина первого электрода, м; l_{electr} – длина первого электрода, м.

6.2.3. Расчёт акустических сопротивлений слоёв

Акустическое сопротивление пьезослоя определяется из выражения

$$z_{piezo}^a = \rho_{piezo} \cdot v_{piezo}, \quad (6.8)$$

где ρ_{piezo} – плотность материала пьезопреобразователя, кг/м³; v_{piezo} – скорость распространения акустической волны в пьезопреобразователе, м/с.

Акустическое сопротивление промежуточного слоя определяется по формуле

$$z_{slice}^a = \rho_{slice} \cdot v_{slice}, \quad (6.9)$$

где ρ_{slice} – плотность материала промежуточного слоя, кг/м³; v_{slice} – скорость распространения акустической волны в промежуточном слое, м/с.

Акустическое сопротивление звукопровода определяется по следующей формуле в случае отсутствия промежуточного слоя (см. Приложение В).

$$z_{duct}^a = \rho_{duct} \cdot v_{duct}, \quad (6.10)$$

где ρ_{duct} – плотность материала звукопровода, кг/м³; v_{duct} – скорость распространения акустической волны в звукопроводе, м/с.

При наличии промежуточного слоя, кроме потери энергии, происходит трансформация акустического сопротивления звукопровода, в связи с чем его можно использовать в качестве элемента для акустического согласования.

6.2.4. Расчёт значения излучаемой акустической мощности пьезослоем и величины потерь преобразования [11]

Эффективность взаимного преобразования электрической энергии в акустическую достигает максимума на частоте основного акустического резонанса, определяемого выражением

$$f_0 = \frac{v_{piezo}}{2 \cdot d_{piezo}}, \quad (6.11)$$

где $d_{piezo} = \frac{\Lambda_{piezo}}{2}$ – толщина пьезопреобразователя, м.

Кроме частоты основного акустического резонанса, эффективность взаимного преобразования достигает максимума на нечётных высших гармониках

$$f_{2n+1} = (2n + 1) \cdot \frac{v_{piezo}}{2 \cdot d_{piezo}}, \quad (6.12)$$

где $n=1, 2, \dots$,

Импеданс пьезослоя, с учётом частотной зависимости, определяется по формуле

$$Z_0^a = \frac{S_{electr\ ef} \cdot c_{mod} \cdot K_{piezo}}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (6.13)$$

где c_{mod} – компонента тензора модулей упругости, н/м²;

Статическая емкость пьезопреобразователя

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{piezo} \cdot S_{electr\ ef}}{d_{piezo}}, \quad (6.14)$$

где ϵ_0 – постоянная диэлектрическая проницаемость, равная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; ϵ_{piezo} – относительная диэлектрическая проницаемость пьезослоя.

Реактивное сопротивление пьезослоя определяется следующим образом

$$X_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C_0}, \quad (6.15)$$

Так как данная модель рассматривает случай согласованного радиотракта, то внутреннее полное электрическое сопротивление радиогенератора z_g определяется характеристическим сопротивлением радиотракта ρ_0 , то есть

$$z_g = \rho_0, \quad (6.16)$$

Значит, электрическая мощность, которую генератор может выделить в согласованную нагрузку равна

$$P_{electr} = \frac{E^2}{\rho_0}, \quad (6.17)$$

Следовательно, усреднённая излучаемая акустическая мощность пьезослоем определяется выражением

$$P_a = 0,5 \cdot \operatorname{Re}\left(\frac{z'_{duct}{}^a}{Z_0^a}\right) \cdot E^2 \cdot |\Psi|^2, \quad (6.18)$$

где E – электродвижущая сила холостого хода радиогенератора, В; $z'_{duct}{}^a$ – акустическое сопротивление звукопровода, зависящее от наличия или отсутствия промежуточного слоя, то есть $z'_{duct}{}^a = z_{duct}^a$ при отсутствии промежуточного слоя, в противном случае, $z'_{duct}{}^a = z_{duct}^{a \text{ trans}}$, $\frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$;

$$\Psi = - \frac{\begin{vmatrix} \frac{\cos(t)}{\sin(t)} & \frac{A}{t} \\ 1 & \frac{A}{t} \\ \frac{\cos(t)}{\sin(t)} & \frac{A}{t} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{\cos(t)}{\sin(t)} & \frac{1}{\sin(t)} & \frac{A}{t} \\ \frac{1}{\sin(t)} & \frac{\cos(t)}{\sin(t)} + j \cdot C & \frac{A}{t} \\ \frac{B}{t} & \frac{B}{t} & \frac{D}{t} + j \cdot G \end{vmatrix}}. \quad (6.19)$$

Раскрывая определители выражения (6.19), будем иметь (6.20):

$$\Psi = - \frac{A \cdot t \cdot (\cos(t) - 1)}{2 \cdot A \cdot B + (-2) \cdot A \cdot B \cdot \cos(t) - C \cdot G \cdot t^2 \cdot \cos(t) - D \cdot t \cdot \sin(t) - j \cdot A \cdot B \cdot C \cdot \sin(t) + j \cdot C \cdot D \cdot t \cdot \cos(t) - j \cdot G \cdot t^2 \cdot \sin(t)};$$

где k_{el} – коэффициент электромеханической связи материала пьезослоя.

Потери преобразования рассчитываются по формуле [11]

$$B_{trans} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{4 \cdot \rho_0 \cdot \operatorname{Re}\left(\frac{z'_{duct}}{Z_0^a}\right) \cdot |\Psi|^2}\right). \quad (6.21)$$

В выражении (6.19) введены следующие обозначения

$$t = \frac{\pi \cdot f}{f_0}, \quad A = k_{el} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot X_0}{Z_0^a}}, \quad B = k_{el} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot X_0}{Z_0^a}}, \quad (6.22)$$

$$C = \frac{z'_{duct}}{Z_0^a}, \quad D = \pi \cdot X_0, \quad G = z_g. \quad (6.23)$$

Из выражения (6.19) видно, что существуют критические точки, которые возникают при обращении $\sin(t)$ в ноль, поэтому необходимо их определить аналитическими выражениями, то есть

если $t = \pi(2n+1)$ или $f = f_0 \cdot (2 \cdot n + 1)$ при $n=0, 1, 2 \dots$, то

$$\psi = \frac{2 \cdot A \cdot t}{4 \cdot A \cdot B + C \cdot G \cdot t^2 - j \cdot C \cdot D \cdot t}. \quad (6.24)$$

если $t = 2 \pi n$ или $f = 2 \cdot f_0 \cdot n$ при $n=0, 1, 2 \dots$, то

$$\psi = 0. \quad (6.25)$$

6.3. Математическая модель потерь акустической мощности

6.3.1. Расчёт мощности акустической волны с учётом прохождения через границу раздела двух сред

Приближения, используемые в этом разделе такие же, как и в 6.1.

При разработке АОЯ необходимо учитывать потери акустической энергии при прохождении через границу двух сред. Коэффициент пропускания при нормальном падении акустической волны на границу раздела двух сред τ_a , оцениваемый по акустической энергии определяется выражением [8]

$$\tau_a = \frac{4 \cdot m}{(m+1)^2}, \quad (6.26)$$

где m – отношение акустических сопротивлений обеих сред.

Для рассматриваемой модели (см. Приложение Б) это случай отсутствия промежуточного слоя, то есть

$$m = \frac{z_{piezo}^a}{z_{duct}^a}. \quad (6.27)$$

Следовательно, в случае отсутствия промежуточного слоя мощность акустической волны, прошедшей в звукопровод из-за отражения на границе раздела двух сред вычисляется следующим образом [8]

$$P_{at} = P_a \cdot \tau_a. \quad (6.29)$$

В случае наличия промежуточного слоя мощность акустической волны, прошедшей в звукопровод из-за отражения на границах раздела двух сред равна [8]

$$P_{at}'' = P_a \cdot \tau_a'', \quad (6.30)$$

где τ_a'' – коэффициент пропускания промежуточного слоя.

6.3.2. Расчёт мощности акустической волны с учетом поглощения в звукопроводе и промежуточном слое

Акустические волны ослабляются при распространении в среде. Данный факт можно отразить выражением, которое показывает величину мощности акустической волны (в определённой точке) распространяющейся в среде звукопровода (в отсутствие промежуточного слоя) [11]

$$P_{ab}(x) = P_{at} \cdot \exp(-2 \cdot \alpha_a \cdot x), \quad (6.31)$$

где x – расстояние, пройденное акустической волной в среде, м; α_a – коэффициент звукопоглощения материала звукопровода, который зависит от агрегатного состояния вещества, м^{-1} :

если среда представляет собой жидкость, то

$$\alpha_a = \alpha_{a02} \cdot \left(\frac{c}{\Lambda_{duct}} \right)^2, \quad (6.32)$$

где α_{a02} – постоянный коэффициент звукопоглощения материала, $\frac{Hn}{m \cdot \Gamma\zeta^2}$, с – скорость света в вакууме.

если среда – твёрдое тело, то

$$\alpha_a = \alpha_{a01} \cdot \left(\frac{c}{\Lambda_{duct}} \right), \quad (6.33)$$

где α_{a01} – постоянный коэффициент звукопоглощения материала, $\frac{Hn}{m \cdot \Gamma\zeta}$.

Таким образом, усреднённая акустическая мощность, поступающая в звукопровод, с учётом всех потерь перечисленных выше и отсутствия промежуточного слоя, определяется выражением

$$P_{aduct} = \frac{P_{at}}{2 \cdot \alpha_a \cdot d_{duct}} \cdot (1 - \exp(-2 \cdot \alpha_a \cdot d_{duct})), \quad (6.34)$$

где d_{duct} – толщина звукопровода, м.

Значит, усреднённая акустическая мощность, пересекающая апертуру светового пучка вычисляется по формуле

$$P_{aD} = \frac{P_{at}}{2 \cdot \alpha_a \cdot D} \cdot (1 - \exp(-2 \cdot \alpha_a \cdot D)), \quad (6.35)$$

где D – апертура светового пучка, равная диаметру светового пучка, м.

А при наличии промежуточного слоя величина мощности акустической волны (в определённой точке) при распространении ее в среде звукопровода определяется по формуле

$$P_{ab}''(x) = P_{at} \cdot \exp(-2 \cdot \alpha_{aslice} \cdot d_{slice}) \cdot \exp(-2 \cdot \alpha_a \cdot x). \quad (6.36)$$

где α_{aslice} – коэффициент звукопоглощения материала промежуточного слоя, м⁻¹.

Усреднённая акустическая мощность, при наличии промежуточного слоя располагаемого в звукопроводе, с учётом всех потерь перечисленных выше, определяется выражением

$$P_{aduct}'' = \frac{P_{at}}{2 \cdot \alpha_a \cdot d_{duct}} \cdot \exp(-2 \cdot \alpha_{aslice} \cdot d_{slice}) \cdot (1 - \exp(-2 \cdot \alpha_a \cdot d_{duct})). \quad (6.37)$$

Потери акустической мощности (на определённой частоте акустической волны) возможны за счет:

1. преобразования электрического сигнала в акустический

$$B_1 = 10 \lg \left(\frac{P_a(f)}{P_{electr}} \right), \quad (6.38)$$

2. отражения на границе раздела

$$B_2 = 10 \lg \left(\frac{P_{at}(f)}{P_a(f)} \right) = 10 \lg(\tau_a(f)), \quad (6.39)$$

3. поглощения в материале звукопровода и промежуточного слоя

$$B_3 = 10 \lg \left(\frac{P_{aD}(f)}{P_a(f)} \right). \quad (6.40)$$

6.4. Математическая модель акустооптического модулятора

Приближения, используемые в математической модели АОМ:

1. Отсутствие дифракционной расходимости лазерного излучения. Потери световой мощности можно пренебречь из-за отсутствия дифракционной расходимости, так как расстояние от источника излучения до акустооптической ячейки мало по сравнению с длиной когерентности лазера.

2. В режиме дифракции Рамана – Ната будем считать, что световой пучок падает на образец нормально.

3. Световая волна, падающая на образец, является плоской монохроматической волной.

4. Падающая световая волна линейно поляризована.

5. Частота акустического колебания много меньше частоты световой волны.

6. Акустическая волна является монохроматической. То есть модулятор будет подобен синусоидальной фазовой дифракционной решётке.

7. В режиме дифракции Рамана-Ната будем считать, что такая АОЯ подобна тонкому фазовому транспаранту. То есть данный транспарант выступает в качестве тонкой дифракционной решётки.

8. В режиме дифракции Брэгга будем считать, что такая АОЯ подобна толстому фазовому транспаранту. Данный транспарант выступает в качестве толстой дифракционной решётки.

9. Отсутствие дифракционной расходимости акустической волны.

6.4.1. Расчёт интенсивности дифрагированного света в режиме дифракции Рамана-Ната

Площадь поперечного сечения пучка лазерного излучения вычисляется следующим образом

$$S_{las} = \frac{\pi \cdot d_{diamlas}^2}{4}, \quad (6.41)$$

где $d_{diamlas}^2$ – диаметр пучка лазерного излучения, м.

Тогда интенсивность лазерного излучения определяется по формуле

$$I_0 = \frac{P_0}{S_{las}}, \quad (6.42)$$

где P_0 – мощность излучения лазера, Вт.

Значит, напряжённость электрического поля лазерного излучения в воздухе равна [14]

$$E_0 = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot I_0}{c}}, \quad (6.43)$$

где c – скорость света в вакууме.

Длина волны лазерного излучения в звукопроводе рассчитывается так

$$\lambda_{duct} = \frac{\lambda}{n_{duct}}, \quad (6.44)$$

где λ – длина волны лазерного излучения в свободном пространстве, м.

Волновое число лазерного излучения определяется

$$k_{duct} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_{duct}}. \quad (6.45)$$

Интенсивность лазерного излучения, прошедшего через звукопровод, без возмущения среды звукопровода акустическими колебаниями определяется из закона Бугера

$$I_{0p} = I_0 \cdot \exp(-\alpha_{opt} \cdot l_{duct}), \quad (6.46)$$

где α_{opt} – коэффициент оптического поглощения, Нп/м; l_{duct} – длина звукопровода, м.

Возникновение упругих колебаний в образце приводит к изменению его показателя преломления. Для изотропной среды

$$\Delta n = \frac{\lambda_{duct}}{2 \cdot \pi \cdot l_{electr}} G_0, \quad (6.47)$$

где G_0 – индекс фазовой модуляции или параметр Гордона.

Так как величина деформации изменяется от точки к точке, то показатель преломления образца также будет промодулирован по закону изменения входного сигнала.

Поскольку скорость звуковой волны $v_{duct} = (3-10) \cdot 10^5$ см/с много меньше скорости света в среде, то можно считать, что в каждый момент времени свет будет взаимодействовать с неподвижной средой, у которой коэффициент преломления меняется от точки к точке. Оптические лучи, проходящие через различные участки модулятора, испытывают различные фазовые сдвиги

$$G_0 = \frac{\pi \cdot n_{duct}^3 \cdot P_{duct}}{\lambda_{duct}} \sqrt{\frac{2 \cdot l_{electr} P_{ad}}{b_{electr} \cdot \rho_{duct} \cdot v_{duct}^3}}, \quad (6.48)$$

где ρ_{duct} –упругооптический коэффициент звукопровода.

Световая волна, выходящая из модулятора, представляет собой пространственно-модулированную по фазе волну, отображающую форму входного сигнала.

Параметр характеризующий режим дифракции определяется выражением

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{electr} \cdot \lambda_{duct}}{\Lambda_{duct}^2}. \quad (6.49)$$

Для бегущей акустической волны в m -дифракционном максимуме интенсивность дифрагированного пучка света в режиме дифракции Рамана-Ната определяется выражением

$$I_{m m} = I_0 \cdot J_m^2(G_0), \quad (6.50)$$

где J_m – функция Бесселя m -ого порядка.

Угол отклонения m -ого дифракционного максимума определяется выражением

$$\theta_m = \arcsin\left(\frac{m \cdot \lambda}{\Lambda}\right). \quad (6.51)$$

где m – номер дифракционного порядка.

Распределение интенсивности света вдоль оси x в дальней зоне в режиме дифракции Рамана-Ната определяется выражением [15]

$$I_m(x) = \left| E_0 \frac{b_{electr} l_{electr}}{\lambda_{duct}} \exp(jk_{duct} l_{electr}) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(\exp(-jm \frac{\pi}{2}) J_m(G_0) \frac{\sin\left(\frac{\pi d_{electr}}{\lambda_{duct}} \left(\frac{x}{F} - \frac{m \lambda_{duct}}{\Lambda_{duct}}\right)\right)}{\frac{\pi d_{electr}}{\lambda_{duct}} \left(\frac{x}{F} - \frac{m \lambda_{duct}}{\Lambda_{duct}}\right)} \right) \right|^2, \quad (6.52)$$

где F – расстояние от образца до экрана, m (определяется границей между зонами Фраунгофера и Френеля и равно $F = 3 \cdot \frac{D^2}{\lambda_{duct}}$).

Направление максимума минус первого порядка в режиме дифракции Брэгга определяется выражением

$$\theta_{br} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2 \cdot \Lambda}\right). \quad (6.53)$$

Интенсивность света в направлении угла Брэгга равна

$$I_{br} = I_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda_{duct}} \cdot \sqrt{\frac{l_{electr} \cdot P_{aD} \cdot n_{duct}^6 \cdot P_{duct}^2}{2 \cdot b_{electr} \cdot \rho_{duct} \cdot v_{duct}^3}} \right). \quad (6.54)$$

Распределение интенсивности света вдоль оси x в дальней зоне в режиме дифракции Брэгга определяется выражением [15]

$$I_{br}(x) = I_0 \cdot \left(\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \Delta n}{\lambda_{duct}} \right)^2 \cdot \left[\frac{\sin \left[\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \Delta n}{\lambda_{duct}} \cdot \sqrt{1 + \frac{4 \cdot n_{duct}^2 \cdot \sin^2(\theta_{br})}{\Delta n^2} \cdot \left(\sin(\theta_{br}) - \frac{x}{F} \right)^2}}{1 - \left(\frac{x}{F} \right)^2} \right]}{\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \Delta n}{\lambda_{duct}} \cdot \sqrt{1 + \frac{4 \cdot n_{duct}^2 \cdot \sin^2(\theta_{br})}{\Delta n^2} \cdot \left(\sin(\theta_{br}) - \frac{x}{F} \right)^2}} \right]^2 \quad (6.55)$$

В реальных акустооптических устройствах акустическая волна, распространяющаяся в звукопроводе испытывает дифракционную расходимость, которую следует учитывать при достижении границы между зонами Френеля и Фраунгофера. Из рисунка 6.1 следует, что вблизи излучателя существует зона Френеля, в которой волна имеет практически плоский фронт, а давление на оси проходит ряд нулевых точек по мере удаления от излучателя. А вдали от излучателя давление на оси уменьшается обратно пропорционально расстоянию от излучателя и пучок акустической волны начинает расходиться. Данная граница определяется по формуле [18]

$$d_{lim} = 0,75 \cdot \frac{D_{rad}^2}{\Lambda}, \quad (6.56)$$

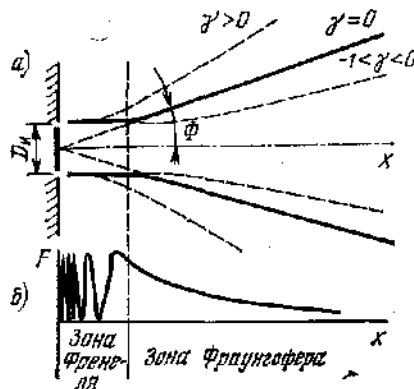


Рис. 6.1. Излучение круглого поршня в полубесконечной среде а – расхождение пучка акустической волны вблизи оси излучателя; б – зависимость относительной величины давления на оси поршня от расстояния; D_n – диаметр излучателя; Φ – угол расхождения пучка; γ – параметр анизотропии материала звукопровода, в изотропном материале $\gamma=0$.

где $D_{rad} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{electr\ ef}}{\pi}}$ – диаметр излучателя.

6.4.2. Расчёт полосы акустооптического взаимодействия модуляторов, работающих в режимах дифракции Рамана-Ната и Брэгга.

Для рамана-натавского АОМ распределение интенсивности света, в зависимости от частоты звука в ± 1 -х дифракционных порядках (при $\theta_0 = 0$), описывается следующим выражением [16]

$$I_{\pm 1} = I_0 \cdot \frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \Delta n}{\lambda_{duct}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \lambda_{duct}}{2 \cdot n_{duct}^2 \cdot v_{duct}^2} \cdot f^2\right)}{\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \lambda_{duct}}{2 \cdot n_{duct}^2 \cdot v_{duct}^2} \cdot f^2}. \quad (6.57)$$

Такое же выражение может быть получено и для режима дифракции Брэгга

$$I_{+1} = I_0 \cdot \left(\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \Delta n}{\lambda_{duct}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \lambda_{duct} \cdot l_{electr}}{2 \cdot n_{duct} \cdot v_{duct}^2} \cdot (f_{br} + \Delta f) \cdot \Delta f\right)}{\frac{\pi \cdot \lambda_{duct} \cdot l_{electr}}{2 \cdot n_{duct} \cdot v_{duct}^2} \cdot (f_{br} + \Delta f) \cdot \Delta f}\right)^2, \quad (6.58)$$

где $\Delta f = f - f_{br}$ (f_{br} – частота сигнала, подводимого к преобразователю, соответствующая выполнению условия дифракции Брэгга).

Анализируя данные выражения можно получить формулы для определения полосы пропускания АОМ:

1. При дифракции Рамана –Ната

$$\Delta f = \sqrt{\frac{2,78 \cdot n^2 \cdot v_{duct}^2}{\lambda \cdot l_{electr}}}. \quad (6.59)$$

2. При дифракции Брэгга

$$\Delta f = \frac{f_{br}}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{11,12 \cdot v_{duct}^2 \cdot n_{duct}}{\pi \cdot l_{electr} \cdot \lambda \cdot f_{br}^2}} - \sqrt{1 - \frac{11,12 \cdot v_{duct}^2 \cdot n_{duct}}{\pi \cdot l_{electr} \cdot \lambda \cdot f_{br}^2}}\right). \quad (6.60)$$

3. По уровню -3 дБ) [16]

$$\Delta f = \frac{5,55 \cdot v_{duct}^2 \cdot d_{duct}}{\pi \cdot l_{electr} \cdot \Lambda \cdot f_{br}}. \quad (6.61)$$

6.4.2. Расчёт эффективности дифракции и быстродействия АОМ

Эффективность дифракции можно рассчитать, используя следующую формулу

$$\eta = \frac{I_{dif}}{I_{0p}} \quad (6.62)$$

где I_{dif} – интенсивность дифрагированного света, Вт/м².

Для расчета частотной зависимости эффективности дифракции используют

$$\eta(f) = \eta_{vax} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \lambda_{duct}}{2 \cdot n_{duct}^2 \cdot v_{duct}^2} \cdot f^2\right)}{\frac{\pi \cdot l_{electr} \cdot \lambda_{duct}}{2 \cdot n_{duct}^2 \cdot v_{duct}^2} \cdot f^2}, \quad (6.62a)$$

где η_{vax} – максимальное значение эффективности дифракции, определяемая по формуле (6.50) или (6.54) в зависимости от режима дифракции.

Быстродействие АОМ (или время переключения) определяется выражением (5.2).

Таким образом, математические модели, приведенные выше, позволяют проследить и проанализировать основные параметры и характеристики АОМ при конструировании акустооптических модуляторов с заданными выходными и входными параметрами, а также характеристиками, что позволяет существенно упростить задачу их конструирования.

Ниже приведены некоторые результаты численного моделирования.

7. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Пример. Исследование основных параметров и характеристик АОМ.

1. Исходные данные:

- длина волны излучения, мкм – 0,63;
- акустооптический дифракционный изотропный модулятор бегущей волны, в состав которого входит: пьезоэлектрический слой, два электрода, звукопровод, поглотитель. Материалы для светозвукопровода, пьезопреобразователя, материалы для промежуточного слоя (см. Приложения В,Г,Д);
- общетехнические требования к основным параметрам акустооптических модуляторов (Приложение А).

Вопросы, подлежащие рассмотрению и разработке:

2. Выбрать математические модели для расчёта основных параметров и характеристик акустооптических модуляторов с учётом требований, указанных в пункте 1:

- математическую модель пьезопреобразователя;
- математическую модель потерь акустической мощности из-за звукопоглощения в материале и отражения на границе раздела двух сред;
- математическую модель акустооптического модулятора для двух режимов дифракции: дифракции Рамана-Ната и Брэгга;
- рассчитать геометрические параметры выбранной модели.

3. Используя материалы численного моделирования для акустооптических модуляторов с параметрами указанными в пункте 2 и приложениях В,Г,Д исследовать:

3.1. Влияние изменения частоты, подаваемого радиосигнала на пьезопреобразователь акустооптического модулятора, на потери преобразования.

3.2. Изменения излучаемой акустической мощности пьезопреобразователя акустооптического модулятора от частоты радиосигнала.

3.3. Влияние изменения частоты радиосигнала на эффективность дифракции акустооптического модулятора.

3.4. Зависимость распределения интенсивности дифрагированного пучка света от частоты радиосигнала.

3.5. Определить быстродействие акустооптического модулятора при заданном материале светозвукопровода.

3.6. Определить потребляемую электрическую мощность акустооптического модулятора.

3.7. Определить полосу пропускания акустооптического модулятора.

3.8. Определить частоту основного акустического резонанса.

Примечание: АОМ используется в качестве устройства ввода информации в оптическую систему обработки данных.

РЕШЕНИЕ: На основе анализа теоретического материала (п.п.5.5.2, 5.5.3, 6. 6.2.1, формулы 6.49) и исходных данных, выберем двухслойный макет акустооптического модулятора при отсутствии промежуточного слоя (Приложение Б) и рассчитаем геометрические размеры пьезопреобразователя d_{piezo} , b_{piezo} – ширина пьезопреобразователя, м; l_{piezo} – длина пьезопреобразователя, м.

7.1. Результаты численного моделирования

Некоторые результаты численного моделирования приведены в электронном виде ниже.

7.1.1. Исследование влияния материала звукопровода на частотную зависимость нормированной эффективности дифракции для первого порядка в режиме дифракции Рамана-Ната

Все исходные значения параметров для численного моделирования приведены в таблице 7.1 и в приложении А. Графическое представление дифракции света на ультразвуке в режиме дифракции Рамана-Ната изображено на рисунке 7.1. Используя формулы (6.52), (6.59) и (5.2) были получены результаты, представленные в таблице 7.2 и на рисунках 7.2-7.3.

Таблица 7.1 – Исходные данные для численного моделирования

Наименование параметра		Значение параметра
Параметры светового излучения	Длина волны гелий-неонового лазера в воздухе, мкм	0,63
	Диаметр пучка светового излучения, прошедшего через первую диафрагму, мкм	100
Параметры акустической волны	Длина звукового столба в поперечном сечении, мм	5
	Диапазон изменения частоты акустической волны, МГц	5-600
	Диапазон изменения несущей частоты электрического сигнала, МГц	5-266
Параметры переключения	Материал светозвукопровода	Дистиллированная вода
		Плавленый кварц

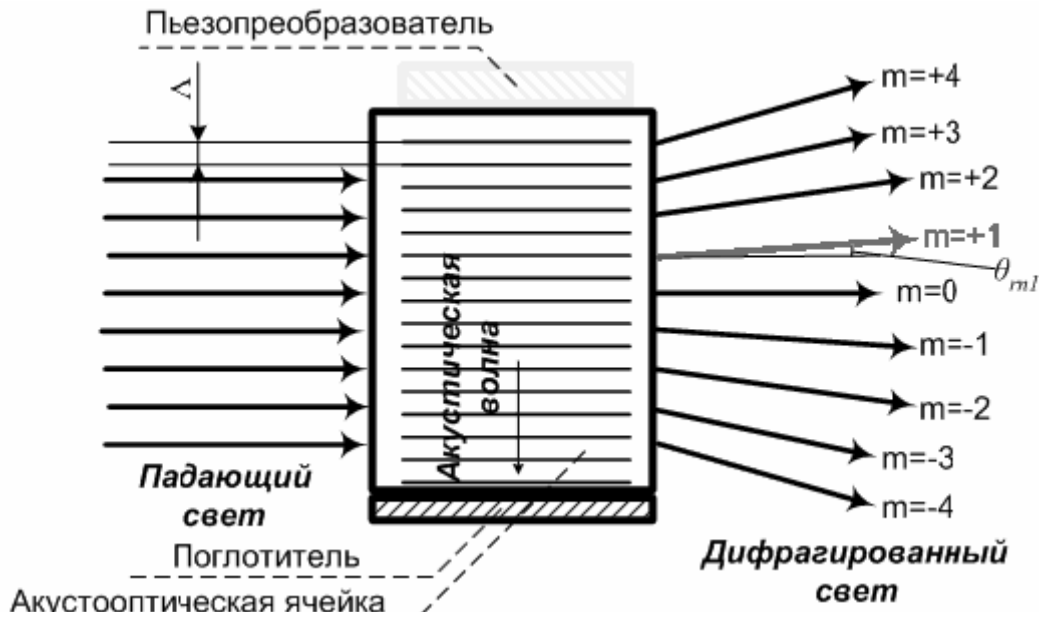


Рис. 7.1. Дифракция света на ультразвуке в режиме Рамана-Ната

Таблица 7.2 – Результаты исследования АОЯ в режиме Рамана - Ната

Материал светозвуко-провода	$t_{sw}, \text{с}$	$\Delta f, \text{Гц}$
Дистиллированная вода	$6.667 \cdot 10^{-8}$	$3.856 \cdot 10^7$
Плавленый кварц	$1.678 \cdot 10^{-8}$	$1.762 \cdot 10^8$

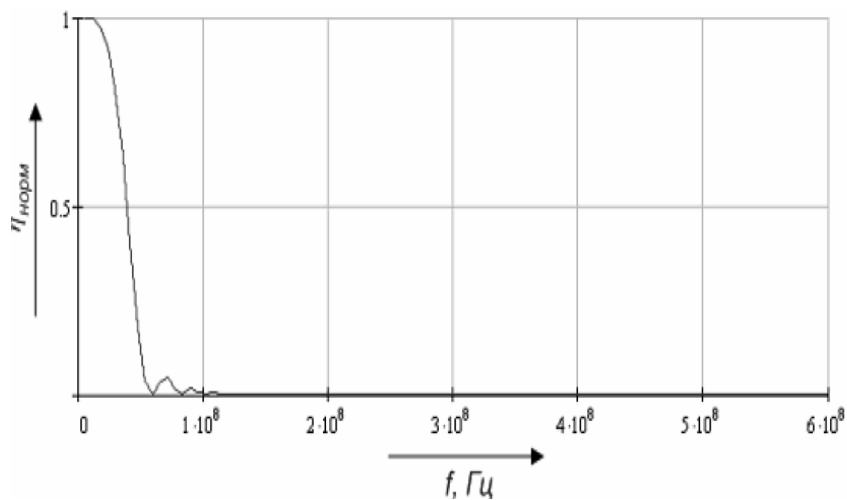


Рис. 7.2. График частотной зависимости нормированной эффективности дифракции для первого порядка в режиме дифракции Рамана-Ната для дистиллированной воды

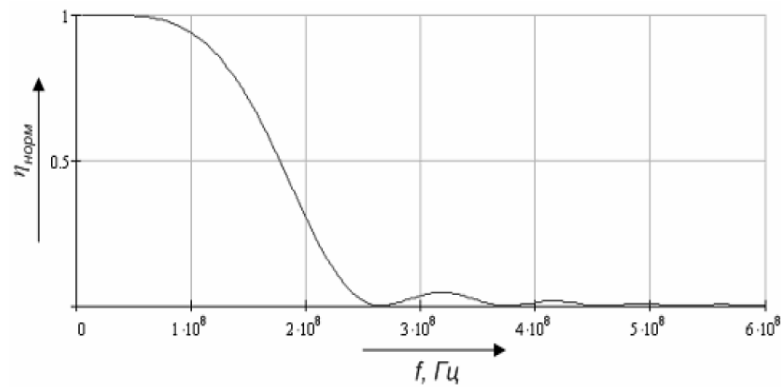


Рис. 7.3. График частотной зависимости нормированной эффективности дифракции первого порядка в режиме дифракции Рамана-Ната для плавленого кварца

7.1.2. Исследование зависимости распределения нормированной интенсивности дифрагированного пучка света от частоты акустического колебания в режиме дифракции Рамана-Ната

Все исходные значения параметров для численного моделирования приведены в таблице 7.3 и в приложении А. Используя формулу (6.52), были получены следующие результаты, представленные в таблице 7.4 и на рисунке 7.4.

Таблица 7.3 – Исходные данные для численного моделирования

Наименование параметра		Значение параметра
Параметры светового излучения	Длина волны гелий-неонового лазера в воздухе, мкм	0,63
	Диаметр пучка светового излучения, прошедшего через первую диафрагму, мкм	100
	Мощность светового излучения, прошедшего через диафрагму, мВт	5
Параметры акустической волны	Длина звукового столба в поперечном сечении, мм	5
	Акустическая мощность, мВт	100
	Диапазон изменения несущей частоты электрического сигнала, МГц	5-266
Параметры переключения	Материал светозвукопровода	дистиллированная вода
		плавленый кварц
		ниобат лития
		тяжёлый флинт
Параметры моделирования	Количество суммируемых порядков	5
	Диапазон исследуемой области пространства распределения нормированной интенсивности дифрагированного пучка света в направлении оси x, мм	от -5 до 5

Таблица 7.4 – Результаты исследования акустооптических ячеек в режиме дифракции Рамана-Ната для дистиллированной воды

Наименование параметра	Значения параметра									
	$f_0, \text{МГц}$	5	34	63	92	121	150	179	208	237
$x_1, \text{мм}$	0,25	0,65	1,2	1,87	2,4	3	3,6	4,2	4,7	-

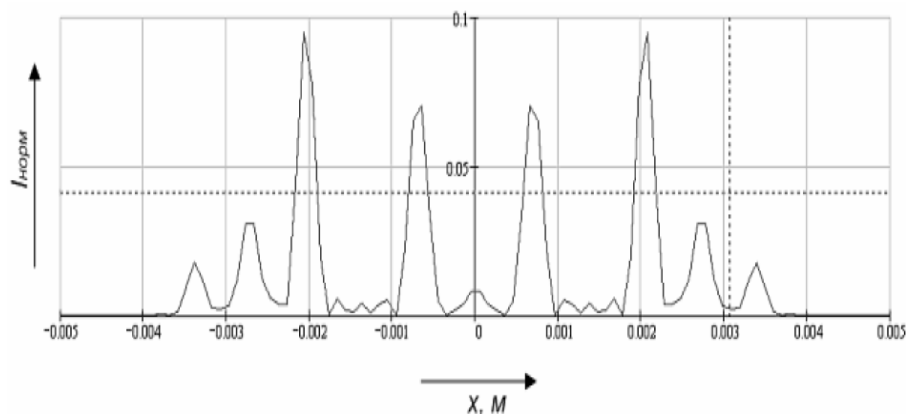


Рис. 7.4. График распределения нормированной интенсивности дифрагированного света вдоль оси x в режиме дифракции Рамана-Ната для дистиллированной воды

7.1.3. Исследование зависимости эффективности дифракции от величины акустической мощности и материала звукопровода в режиме дифракции Рамана-Ната.

Исходные значения параметров для численного моделирования приведены в таблице 7.5 и в приложении А. Используя формулу (6.50), были получены следующие результаты, представленные на рисунке 7.5.

Таблица 7.5 – Исходные данные для численного моделирования

Наименование параметра		Значение параметра
Параметры светового излучения	Длина волны гелий-неонового лазера в воздухе, мкм	0,63
	Диаметр пучка светового излучения, прошедшего через первую диафрагму, мкм	100
	Мощность светового излучения, прошедшего через диафрагму, мВт	5
Параметры акустической волны	Длина звукового столба в поперечном сечении, мм	5
	Акустическая мощность, мВт	1-1000
Параметры переключения	Материал светозвукопровода	дистиллированная вода
		плавный кварц
		ниобат лития
		тяжёлый флинт
Параметры моделирования	Номер дифракционного порядка	1

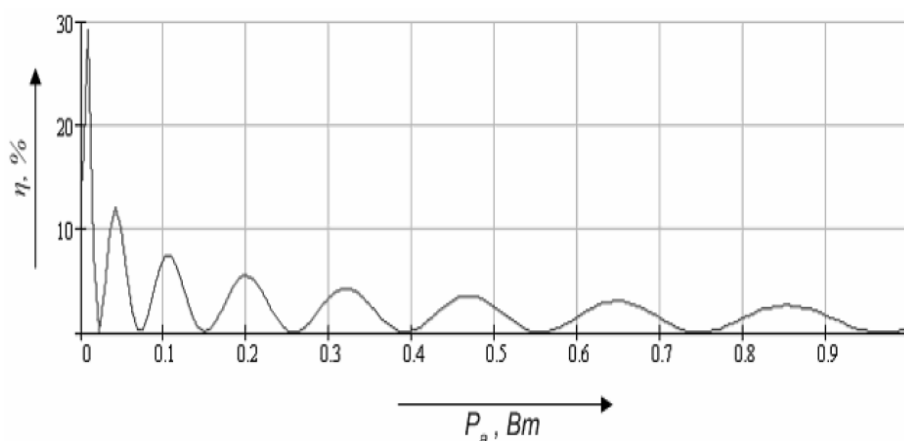


Рис. 7.5. График зависимости эффективности дифракции от величины акустической мощности в режиме дифракции Брэгга для дистиллированной воды

7.1.4. Исследование частотной зависимости потерь преобразования при изменении толщины пьезопреобразователя и материала пьезослоя

Исходные значения параметров для численного моделирования приведены в таблице 7.6 и в приложениях А и В. Используя формулу (6.21), были получены следующие результаты, представленные в таблице 7.7 и на рисунке 7.6.

Таблица 7.6 – Исходные данные для численного моделирования

Наименование параметра		Значение параметра
Параметры светового излучения	Диаметр пучка светового излучения, прошедшего через первую диафрагму, мкм	100
	Толщина пьезопреобразователя, мкм	10-100
Геометрические параметры преобразователя акустических волн	Длина электрода, мм	5
	Ширина электрода, мкм	100
	Материал пьезослоя	ниобат лития плавный кварц окись цинка молибдат свинца титанат бария
Параметры переключения	Материал светозвукопровода	ниобат лития
	Промежуточный слой	Отсутствует
Параметры радиотракта	Выходное сопротивление радиотракта, Ом	50
	Диапазон частот радиосигнала, МГц	1-500

Таблица 7.7 – Результаты исследования пьезопреобразователя из плавленого кварца

Наименование параметра	Значение параметра									
$d_{piezo}, \text{мкм}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$f_{0 \text{ ак}}, \text{МГц}$	286	143	95	71	57	47	40	35	31	28
$f_{\text{мин}}, \text{МГц}$	142	72	142	107	87	71	61	51	16	41
$\Delta f_{piezo}, \text{МГц}$	25	26	126	40	80	10	21	60	40	45
$B_{trans \text{ min}}, \text{дБ}$	5,2	6,5	7,9	7,7	10	7,3	8,3	10,3	9	10,5

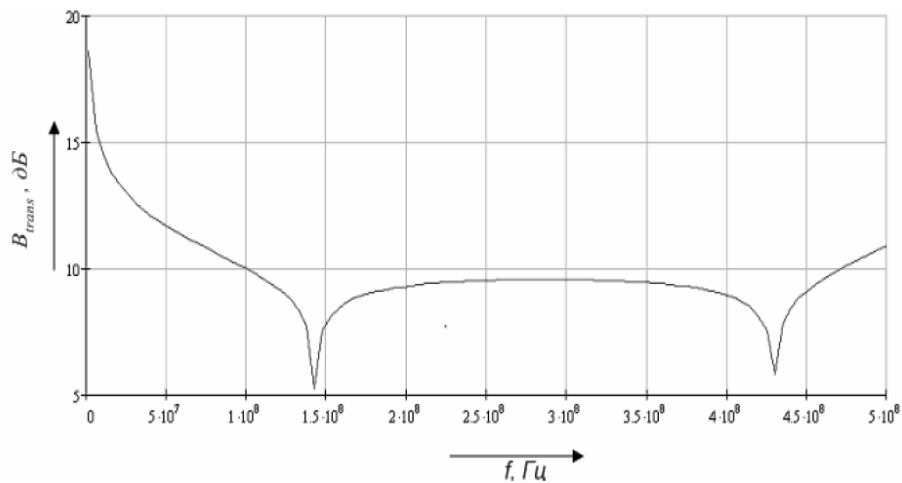


Рис. 7.6 – График частотной зависимости потерь преобразования для плавленого кварца в качестве материала пьезослоя при $d_{piezo}=10 \text{ мкм}$

7.1.5. Исследование частотной зависимости акустической мощности при изменении электрической мощности и материала звукопровода

Все исходные значения параметров для численного моделирования приведены в таблице 7.8 и в приложениях А, Б и В. Используя формулу (6.18), (6.29) и (6.35), были получены следующие результаты, представленные в таблице 7.9 и на рисунке 7.7.

Таблица 7.8 – Исходные данные для численного моделирования

Наименование параметра		Значение параметра
Параметры светового излучения	Диаметр пучка светового излучения, прошедшего через первую диафрагму, мкм	100
	Толщина пьезопреобразователя, мкм	10
Геометрические параметры преобразователя акустических волн	Длина электрода, мм	5
	Ширина электрода, мкм	100
	Толщина промежуточного слоя, мкм	3
	Материал светозвукопровода	дистиллированная вода плавленый кварц ниобат лития тяжёлый флинт
Параметры переключения	Материал промежуточного слоя	золото
	Промежуточный слой	Присутствует
	Материал пьезослоя	Молибдат свинца
Параметры радиотракта	Выходное сопротивление радиотракта, Ом	50
	Диапазон частот радиосигнала, МГц	1-500
	Подаваемая электрическая мощность, Вт	0,1-1
	Частота основного акустического резонанса, МГц	187,5

Таблица 7.9 – Результаты исследования звукопровода из дистиллированной воды

Наименование параметра	Значение параметра									
$P_{electr}, Вт$	0,1000	0,2000	0,3000	0,4000	0,5000	0,6000	0,7000	0,8000	0,9000	1,0000
$P_a(f_0 ак), Вт$	0,0370	0,0750	0,1120	0,1490	0,1870	0,2240	0,2610	0,2990	0,3360	0,3730
$\tau_a(f_0 ак)$	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480
$P_{at}(f_0 ак), Вт$	0,0017	0,0035	0,0053	0,0071	0,0089	0,0110	0,0130	0,0140	0,0160	0,0180
$P_{aD}(f_0 ак), Вт$	0,0016	0,0032	0,0049	0,0065	0,0082	0,0090	0,0110	0,0130	0,0150	0,0160
$B1, дБ$	4,3180	4,2597	4,2790	4,2887	4,2713	4,2790	4,2846	4,2742	4,2790	4,2829
$B2, дБ$	13,3775	13,3099	13,2494	13,2193	13,2245	13,0886	13,0270	13,2954	13,2222	13,1644
$B3, дБ$	0,2633	0,3892	0,3408	0,3834	0,3558	0,8715	0,7255	0,3218	0,2803	0,5115

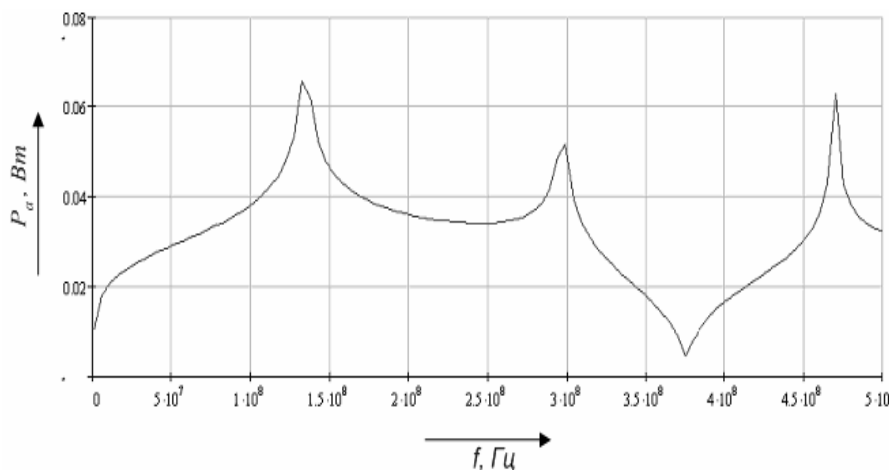


Рис.7.7 График частотной зависимости излучаемой акустической мощности пьезопреобразователя для дистиллированной воды в качестве материала звукопровода при $P_{electr}=1 \text{ Вт}$

8. ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА (ЭОМ)

Как было показано выше, модулятор – это устройство, которое позволяет осуществлять конвертирование цифровых данных в линейный код, имеющий формат, удобный для передачи по оптическому волокну. Кроме того, использование специального модулятора, как правило, улучшает функциональные характеристики систем передачи и гибкость системы в целом, например, при необходимости позволяет менять формат использованной линейной кодовой последовательности.

Особенностью ЭОМ по сравнению с АОМ является широкополостность. Следует отметить, что в малогабаритных системах передачи часто необходимо модулятор изготавливать как единое целое с волоконной линией передачи, где удобнее использовать ЭОМ.

С помощью модуляции производят наложение информации на световую волну или световой поток, осуществляющий перенос этой информации.

Важнейшими характеристиками ЭОМ модуляторов являются:

- эффективность модуляции

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (8.1)$$

где I_{\max} и I_{\min} - интенсивности света при полностью открытом и закрытом состоянии модулятора;

- быстродействие, или полоса частот модуляции $\Delta\nu$ (определяет предельный объем информации, который можно передать с помощью данного модулятора);
- рабочая апертура – угол, измеряемый в градусах или стерadiansах, в пределах которого оптическое излучение может быть введено в модулятор;
- спектральная область – область длин волн, в которой модулятор способен работать;
- амплитуда управляющего сигнала, характеризующая чувствительность среды и выражаемая, обычно, через полуволновое напряжение ;
- оптические потери, вносимые модулятором, выражаемые, как правило, в децибелах

$$\beta = 10 \lg \frac{I_0}{I_{\max}}; \quad (8.2)$$

где I_0 – интенсивность света в отсутствие модулятора, I_{\max} - интенсивность света, прошедшего через модулятор в открытом состоянии;

- потребляемая мощность на единицу ширины полосы пропускания модулятора $\frac{P}{\Delta f}$, выражаемая обычно в Вт/Гц;

- глубина модуляции

$$m = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{(I_{\max} + I_{\min})}; \quad (8.3)$$

- контраст

$$K = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}; \quad (8.4)$$

- степень нелинейности (искажений);

- эксплуатационные характеристики (отсутствие усталости, механическая прочность, гигроскопичность, технологичность изготовления, стоимость и т.д.).

Указанные характеристики устройств определяются, прежде всего, свойствами применяемых материалов и физическими эффектами в них, а затем схемами управления и конструктивными особенностями [8,27,39].

8.1. Краткая теория. Основные соотношения и характеристики.

8.1.1. Электрооптический эффект

В основе принципа действия ЭОМ лежит явление электрооптического эффекта – изменение показателя преломления среды под действием приложенного постоянного или переменного внешнего электрического поля [27]. Поэтому понимание природы распространения света в кристаллах, при наличии или отсутствии, приложенных электрических полей является важной предпосылкой к изучению электрооптической модуляции света.

В некоторых кристаллах, не имеющих центра симметрии, величина изменения показателя преломления Δn пропорциональна напряженности электрического поля E ($\Delta n \sim E$) или $\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_i = r_{ij} E_j$ – это линейный электрооптический эффект, или эффект Погкельса [39].

Известен также квадратичный электрооптический эффект, или эффект Керра, который может наблюдаться в любой среде, включая жидкости и газы. Величина Δn в этом случае пропорциональна квадрату напряженности поля ($\Delta n \sim E^2$).

8.1.2. Прохождение света через анизотропную среду

Оптическая индикатриса. Двойное лучепреломление [29]. Связь между электрической индукцией (электрическим смещением) D и напряженностью

электрического поля E волны, распространяющейся в анизотропной среде (как известно из курса электродинамики) определяется следующим соотношением

$$D_i = \sum \varepsilon_{ij} E_j, \quad (8.5)$$

где ε_{ij} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды.

Тензорный характер зависимости означает, что в общем случае в анизотропной среде векторы \mathbf{D} и \mathbf{E} могут иметь различные направления. В конечном итоге это приводит к тому, что при распространении световой волны в анизотропной среде направление нормали к волновому фронту (направление волнового вектора \mathbf{k}) отличается от направления распространения световой энергии (направление вектора плотности светового потока – вектора Пойнтинга \mathbf{S}).

В отличие от оптически изотропной среды, где поверхность одинаковой плотности энергии излучения представляется в виде сферы, в анизотропной среде поверхность имеет довольно сложную форму. Плотность электрической энергии поля излучения ρ_E в ней, при произвольно выбранной системе координат (x, y, z), представится в виде

$$\rho_E = \frac{1}{8\pi} \sum E_i D_i = \frac{1}{8\pi} \sum E_i \varepsilon_{ik} E_k \quad (8.6)$$

Используя, в качестве анизотропной среды, монокристалл выражение (8.6) можно существенно упростить, определенным выбором координатной системы X, Y, Z , в которой тензор диэлектрической проницаемости среды диагонализуется ($\varepsilon_{ij} = 0$ при $i \neq k$) и выражение (8.5) преобразуется к виду

$$D_i = \sum \varepsilon_{ii} E_i \quad \text{или} \quad \varepsilon \cdot E = (\varepsilon_{ii} \cdot E) \sum_{l=x,y,z} \frac{n^2 \varepsilon_l^2}{n^2 - \varepsilon_l} \quad (8.7)$$

(в дальнейшем вместо ε_{ii} будем писать ε_i).

Координатные оси системы X, Y, Z называются главными диэлектрическими осями кристалла, а $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$ – главными значениями тензора диэлектрической проницаемости. Так как $n_i = \sqrt{\varepsilon_i}$, то n_X, n_Y, n_Z – главные показатели преломления кристалла.

При этом поверхность с одинаковым значением плотности энергии излучения будет иметь вид трехосного эллипсоида, главные оси которого пропорциональны главным показателям преломления:

$$\left. \begin{aligned} x^* &= \frac{D_x}{\sqrt{8\pi\rho_E}}; \\ y^* &= \frac{D_y}{\sqrt{8\pi\rho_E}}; \\ z^* &= \frac{D_z}{\sqrt{8\pi\rho_E}}; \end{aligned} \right\} \quad (8.8)$$

С учетом выше сказанного выражение (8.6) можно записать в виде:

$$\frac{(x^*)^2}{n_x^2} + \frac{(y^*)^2}{n_y^2} + \frac{(z^*)^2}{n_z^2} = 1 \quad (8.9)$$

Данное уравнение описывает эллипсоид (*поверхность с одинаковым значением плотности энергии излучения, называемой оптической индикатрисой*) с главными полуосями, равными значениям главных показателей преломления n_x , n_y и n_z . В данном случае этот эллипсоид и является оптической индикатрисой кристалла. Оптическая индикатриса имеет важное практическое значение. С ее помощью можно полностью описать оптические свойства кристалла (для однозначности описания принимают условие $n_x \leq n_y \leq n_z$).

Основная особенность анизотропных сред, в отличие от изотропных сред, в том, что *в анизотропной среде свет может распространяться только в виде линейно поляризованных волн* в каждом направлении (волны имеют одинаковую частоту и одинаковое направление волнового вектора, но отличаются скоростью распространения и поляризацией). В *изотропной среде* проходящая световая волна может иметь *любую поляризацию*.

Для определения направления поляризации волн, распространяющихся в анизотропной среде и, соответствующих этим волнам, показателей преломления, пользуются оптической индикатрисой. Задавшись направлением распространения волнового фронта волны (вектора \mathbf{k}), находят сечение оптической индикатрисы плоскостью, проходящей через ее центр и перпендикулярной вы-

бранному направлению (рис. 8.1, а). В общем случае такое сечение является эллипсом (рис. 8.1, б). Направления главных осей этого эллипса как раз и представляют собой направления поляризации проходящих волн (направления векторов \mathbf{D}_1 и \mathbf{D}_2), а их длины определяют показатели преломления n_1 и n_2 . Оси эллипса всегда ортогональны и направления поляризации волн, распространяющихся в любом направлении, всегда взаимно перпендикулярны. Показатели преломления связаны со скоростью распространения световой волны в веществе

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{c}{n_1}; \\ v_2 &= \frac{c}{n_2}. \end{aligned} \right\} \quad (8.10)$$

Скорости v_1 и v_2 представляют собой скорости распространения фазы волны, измеренные вдоль нормали к волновому фронту, и поэтому называются нормальными скоростями.

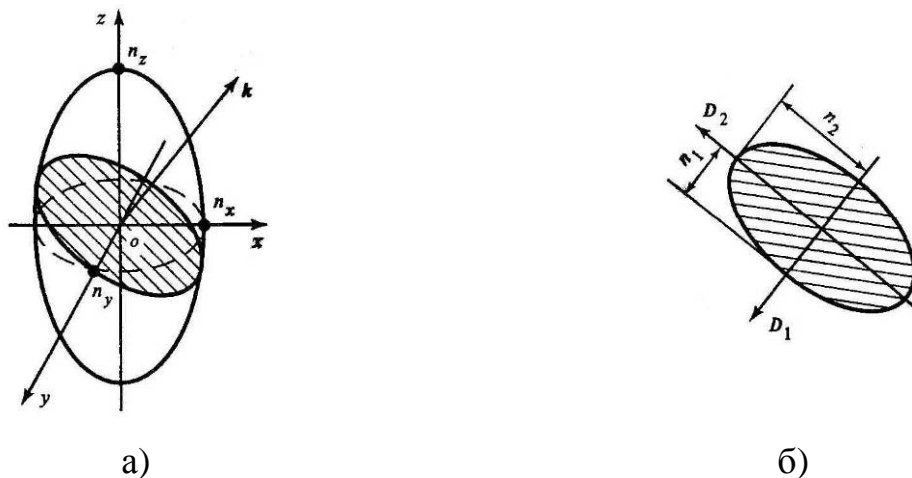


Рис. 8.1. (а) Сечение индикатрисы плоскостью, проходящей через ее центр и перпендикулярной выбранному направлению; (б) - сечение индикатрисы

Из-за различия в скоростях, одна из волн в процессе распространения в среде будет отставать от другой, благодаря чему на выходе из кристалла длиной L между обеими волнами создается некоторая разность фаз

$$\Delta\varphi = \omega L \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right). \quad (8.11)$$

Учитывая (8.9) и, используя соотношение $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$, получаем

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda}(n_1 - n_2) \approx \frac{2\pi \cdot n_0^3 r \cdot E_z \cdot L}{\lambda}. \quad (8.12)$$

Величина $\Delta = L(n_1 - n_2)$ есть разность оптических путей двух волн в кристалле. Наличие разности хода в одном направлении для двух волн отражает способность анизотропных сред к весьма специфическому явлению – двойному лучепреломлению. Отнесенная к единице пути разность хода

$$B_{12} = \frac{\Delta}{L} = n_1 - n_2. \quad (8.13)$$

Этот параметр является одной из важнейших оптических характеристик кристалла и называется двулучепреломлением кристалла.

8.1.3. Оптические оси кристаллов. Одноосные кристаллы

Направление в кристалле, распространяясь вдоль которого, свет не «чувствует» влияния анизотропии его оптических свойств (сечение в виде круга рис.8.2) называется оптической осью кристалла [7].

Существуют кристаллы, в которых оптическая индикатриса имеет вид эллипсоида вращения (рис. 8.2). В таком эллипсоиде имеется только одно круговое сечение, и в соответствии с этим в подобных кристаллах существует

лишь одно направление (ортогональное этому сечению), вдоль которого не происходит двойного лучепреломления. Такие кристаллы называются одноосными и характеризуются всего двумя главными показателями преломления n_0 и n_e , полностью определяющими форму индикатрисы: $n_0 = n_x = n_y$; $n_e = n_z$.

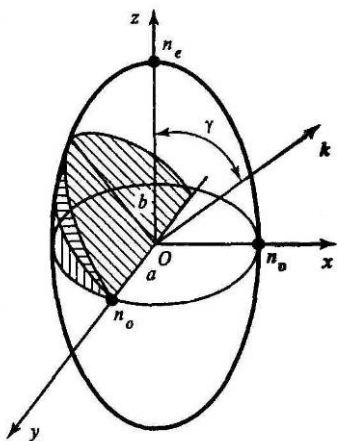


Рис. 8.2. Индикатриса одноосных кристаллов.

Из рис. 8.2 следует, что полуось а) всегда равна радиусу n_0 кругового сечения, в то время как другая ось b принимает различные

значения от n_0 до n_e в зависимости от угла наклона секущей плоскости. Это означает, что одна из распространяющихся в кристалле волн, направление поляризации которой определяется полуосью a , независимо от направления распространения всегда имеет один и тот же показатель преломления n_0 . Такая волна называется обыкновенной.

Благодаря постоянству показателя преломления обыкновенная волна распространяется в одноосном кристалле в любом направлении с одинаковой скоростью

$$v_0 = \frac{c}{n_0} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_0}}. \quad (8.14)$$

Другая волна, направление поляризации которой определяется второй полуосью соответствующего эллиптического сечения, называется необыкновенной волной. С изменением показателя преломления для необыкновенной волны (от n_0 до n_e) изменяется и скорость прохождения светового луча в зависимости от направления его распространения

$$v_e = c \sqrt{\left(\frac{\sin^2 \gamma}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \gamma}{n_0^2} \right)}, \quad (8.15)$$

где γ – угол между направлением волнового вектора k и оптической осью кристалла.

При распространении света вдоль оптической оси ($\gamma = 0$) скорость необыкновенной волны равна скорости обыкновенной и эффекта двойного лучепреломления не наблюдается. При $\gamma = \frac{\pi}{2}$ разность в скоростях указанных волн достигает максимального значения и двулучепреломление приобретает наибольшее значение:

$$B_{12} = n_1 - n_2 = n_e - n_0 \quad (8.16)$$

Отметим еще раз, что обыкновенный и необыкновенный лучи, проходящие через кристалл, линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях [27, 29, 39, 40]].

8.1.4. Поверхность показателей преломления. Положительные и отрицательные кристаллы

Для характеристики оптических свойств анизотропных сред часто пользуются так называемой поверхностью показателей преломления. Для обыкновенной волны поверхность показателей преломления имеет вид сферы радиусом n_0 , необыкновенная же волна характеризуется поверхностью показателей преломления в виде эллипсоида вращения с полуосями n_0 и n_e . Обе поверхности показателей преломления соприкасаются в двух точках, где их пересекает оптическая ось, являющаяся одновременно и осью вращения эллипсоида.

Сечения этих поверхностей плоскостью zy показаны на рис. 8.3. Как видно, возможны два случая. При $n_e > n_0$ говорят о положительном одноосном кристалле (рис. 8.3, а), а при $n_e < n_0$ – об отрицательном одноосном кристалле (рис. 8.3, б).

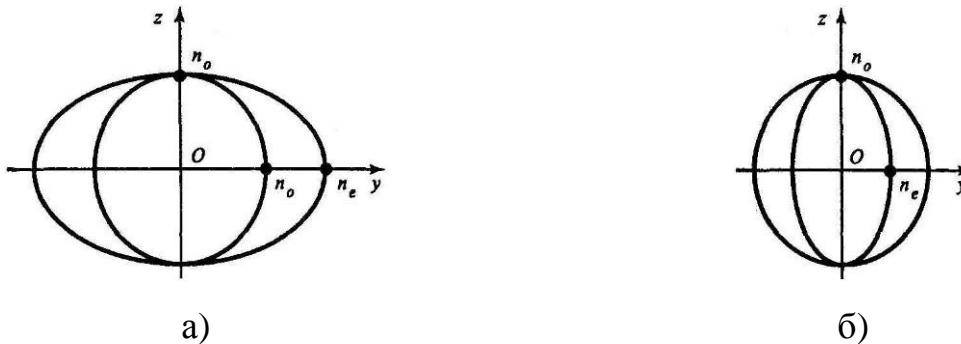


Рис. 8.3. Сечение индикатрисы для положительного (а) и отрицательного (б) одноосных кристаллов

Пользуясь поверхностью показателей преломления, можно описать двулучепреломляющие свойства кристалла в любом направлении. Зная направление волнового вектора \mathbf{k} , можно определить значения показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн, продвигаясь вдоль вектора \mathbf{k} из центра O до пересечения с соответствующей поверхностью.

Угол α между \mathbf{k} и \mathbf{S} называется углом двойного лучепреломления (рис. 8.4).

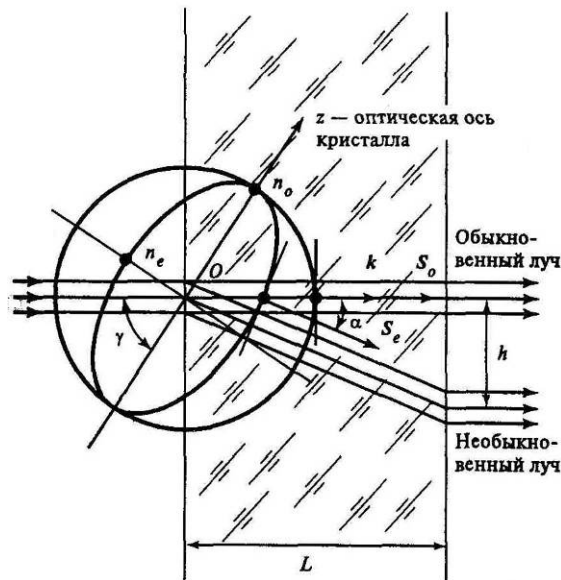


Рис. 8.4. Определение угла двойного лучепреломления.

При падении достаточно узкого пучка естественного света на кристалл под некоторым углом к его оптической оси происходит расщепление пучка на обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный луч проходит через кристалл, не преломляясь и не изменяя направления распространения в кристалле. Необыкновенный луч преломляется на передней грани кристалла и распространяется в нем под углом α по отношению к направлению первичного пучка. Если толщина L кристалла достаточно велика, то на выходе из кристалла обыкновенный и необыкновенный лучи оказываются разнесенными в пространстве и распространяются далее в виде двух отдельных пучков, линейно поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Таким образом, эффект двойного преломления можно использовать для разделения обыкновенного и необыкновенного лучей в пространстве с одновременным преобразованием естественного неполяризованного света в плоскополяризованный.

Значение угла α зависит от формы эллипсоида поверхности показателей преломления для данного кристалла, определяемой отношением n_o/n_e , и от угла γ между направлением падающего пучка и оптической осью кристалла. Максимальное значение угла α реализуется при

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{n_o}{n_e}. \quad (8.17)$$

В этом случае расстояние h между лучами на выходе из кристалла (при некоторой фиксированной его толщине L) окажется также максимальным и определится соотношением

$$h = L \cdot \frac{\operatorname{tg}(n_0^2 - n_e^2)}{2n_0n_e}. \quad (8.18)$$

Практически максимальное разнесение пучков в пространстве наблюдается при углах γ , близких к 45° .

При $\gamma = 0$ и $\gamma = 90^\circ$ угол $\alpha = 0$. В случае, когда луч распространяется вдоль оптической оси ($\gamma = 0$) с ним не происходит никаких изменений, при $\gamma = 90^\circ$ – наблюдается, так называемый, эффект вращения плоскости поляризации проходящего луча. Падающий луч света, с определенной поляризацией, разлагается на обыкновенную и необыкновенную волны, поляризации которых ортогональны. Эти волны, хотя и распространяются в одном направлении, тем не менее, имеют различные скорости:

$$\left. \begin{aligned} v_0 &= \frac{c}{n_0}; \\ v_e &= \frac{c}{n_e}; \end{aligned} \right\} \quad (8.19)$$

Совпадая по фазе, на входе кристалла, волны выходят из него с разными фазами. Появление разности фаз приводит к образованию суммарной волны с поляризацией, вообще говоря, отличной от начальной. Это воспринимается как вращение плоскости поляризации [7].

8.2. Принцип действия электрооптических модуляторов

Принцип действия электрооптических модуляторов основан на изменении эллипсоида показателей преломления под действием внешнего электрического поля. При распространении линейно-поляризованных нормальных мод через ЭОМ, показатель преломления будет зависеть от напряженности поля, согласно уравнению $\Delta n = -(n^3 / 2) \cdot r \cdot E$. Фазовый сдвиг этих нормальных мод, при прохождении через кристалл, должен зависеть от показателя преломления.

Поэтому, после прохождения в кристалле расстояния L , волна претерпевает следующий фазовый сдвиг благодаря наложенному электрическому полю:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \cdot r \cdot E \cdot L, \quad (8.20)$$

где λ – длина волны света, n_0 – показатель преломления в отсутствие поля, r – соответствующий электрооптический коэффициент, а E – напряжённость приложенного электрического поля. Если E изменяется во времени синусоидально, то фазовая задержка волны, следующая за изменением приложенного электрического поля, изменяется также синусоидально (если только частота модуляции не слишком высока). Таким образом, электрооптический эффект непосредственно приводит к фазовой модуляции этих нормальных мод.

Амплитудную модуляцию можно получить, комбинируя две распространяющиеся нормальные моды и два различных индуцированных электрооптических фазовых сдвига. Обычно, для создания фазовой задержки линейно-поляризованного света, необходимо иметь всего один поляризатор. Для амплитудной же модуляции требуется дополнительный поляризатор (анализатор), ориентированный под определённым углом.

В зависимости от направления приложенного электрического поля, электрооптическая модуляция световых волн подразделяется на два основных типа: продольную и поперечную.

8.2.1. Продольная и поперечная электрооптическая модуляция

Продольная электрооптическая модуляция. На рис. 8.5 изображена геометрия продольного электрооптического модулятора. Этот модулятор представляет собой тонкую электрооптическую кристаллическую пластину большой площади.

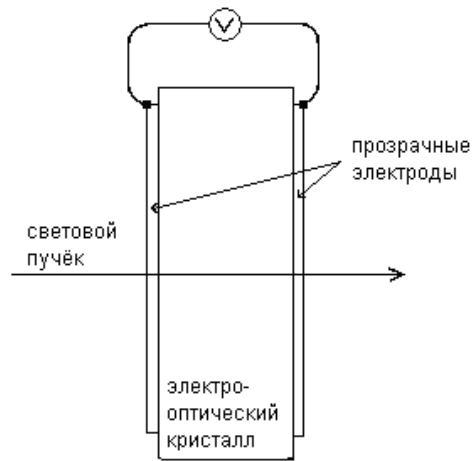


Рис. 8.5. Геометрия типичного электрооптического модулятора.

Вектор модулирующего электрооптического поля параллелен направлению распространения света всюду, кроме области электродов. В случае линейного электрооптического эффекта изменение показателя преломления, вызванное электрическим полем, пропорционально напряжённости электрического поля E . Вызванное электрическим полем изменение фазы (фазовая задержка) для света, проходящего через кристаллическую пластинку, пропорционально величине EL , которая равна приложенному напряжению V и не зависит от толщины кристаллической пластины L .

Электрооптические кристаллы z -среза. Для кристаллов z -среза главные значения показателя преломления, даются выражениями:

$$\begin{aligned} n_x &= n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{13} E, \\ n_y &= n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{13} E, \\ n_z &= n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E, \end{aligned} \quad (8.21)$$

где предполагается, что $n^3 r E \ll n$. В случае $n_x = n_y$, кристалл является оптически одноосным и *оптическая ось* остаётся неизменной. Свет, распространяющийся вдоль оси z , будет претерпевать один и то же сдвиг фазы независимо от его поляризации. Следовательно, такой модулятор может модулировать фазу неполяризованного лазерного пучка. Световой пучок, прошедший через модулятор, приобретает фазовый множитель e^{-ikL} , который содержит фазу, отвечающую нулевому полю ($E = 0$), и электрически индуцированное изменение фазы:

$$kL = \frac{2\pi}{\lambda} n_0 L - \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{13} V, \quad (8.22)$$

где V – приложенное напряжение. *Напряжение, требуемое для изменения фазы на π , называется полуволновым напряжением* фазовой модуляции и даётся выражением:

$$V_\pi = \frac{\lambda}{n_0^3 r_{13}} \quad (8.23)$$

Если положенное напряжение синусоидально изменяется во времени, то прошедший пучок будет модулированным по фазе и его можно записать в следующем виде:

$$E(z, t) = A \exp[i(\omega t - kz - \phi_0 + \delta \sin \omega_m t)], \quad (8.24)$$

где A – постоянная амплитуда,

$$\delta = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{13} V_m = \pi \frac{V_m}{V_\pi}, \quad (8.25)$$

$$\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_0 L. \quad (8.26)$$

Поскольку в устройстве с такой геометрией электрическое поле не индуцирует двулучепреломление, фазовая задержка между любыми двумя ортогонально поляризованными волнами отсутствует. Без введения обратной связи такое устройство не позволяет осуществить амплитудную модуляцию.

Аналогичным образом ведут себя z -срезы других одноосных электрооптических кристаллов; исключение составляют кристаллы с группой симметрии $\bar{4}2m$ или $\bar{4}$.

Для пластинок z -среза кубического кристалла приложенное электрическое поле приводит к повороту x и y вокруг z на угол 45° , так как электрическое поле действует в направлении оси z [7].

Если пластинку нужно использовать в качестве *фазового модулятора*, то свет должен быть поляризован в направлении либо оси x' либо y'

Если пластинка применяется в качестве *амплитудного модулятора*, то передний поляризатор нужно выставить вдоль оси x таким образом, чтобы x' и y' возбуждались с одинаковыми амплитудами.

Полуволновое напряжение, в случае амплитудной модуляции, определяется как напряжение, необходимое для получения фазового сдвига на π , и даётся выражением:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n^3 r_{41}}. \quad (8.27)$$

Если модулирующее напряжение синусоидально изменяется во времени и последовательно с электрооптическим кристаллом располагается, соответствующим образом ориентированная, четвертьволновая пластинка, то фазовая задержка принимает вид:

$$\Gamma = \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{\lambda} n^3 r_{41} V_m \sin \omega_m t = \frac{\pi}{2} + \pi \frac{V_m}{V_{\pi}} \sin \omega_m t. \quad (8.28)$$

Ориентируя поляризатор на выходе перпендикулярно поляризатору на входе, можно амплитудную модуляцию преобразовать в фазовую. Коэффициент пропускания полной структуры при этом равен $T = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)$, где Γ определяется выражением (8.28). Если $\pi V_m \ll V_{\pi}$, то коэффициент пропускания T приближенно записывается в виде:

$$T = T_0 (1 + \Delta \sin \omega_m t), \quad (8.29)$$

где $T_0 = \frac{1}{2}$, $\Delta = \Gamma_m = \frac{\pi V_m}{V_{\pi}}$ – глубина модуляции.

Благодаря симметрии, пластинки из x - или z -срезов кубического кристалла будут вести себя точно таким же образом, как и пластинка из y -среза.

Поперечная электрооптическая модуляция. Если электрическое поле перпендикулярно направлению распространения, то модуляцию называют поперечной. При данной напряжённости электрического поля такая структура позволяет обеспечить большую длину взаимодействия. Можно показать, что изменение фазы (или фазовая задержка) для света, проходящего через кристаллическую пластинку, пропорционально при этом величине LE , или vL/d , где d – расстояние между электродами. То есть изменение фазы пропорционально длине кристалла L . Это преимущество было использовано при создании элек-

трооптических модуляторов лазерных пучков с низкими управляющими напряжениями.

Пример: Электрооптический модулятор для преобразования линейной поляризации световой волны в эллиптическую поляризацию с возможностью задания параметра эллиптичности.

Исходные данные: длина волны света $\lambda=633$ нм; апертура светового пучка – до 3 мм; максимальное управляющее напряжение – 1000 В.

Примечание: модулятор должен работать как электрически управляемый элемент преобразования поляризации излучения He-Ne лазера в экспериментальных лабораторных установках по исследованию эффектов линейного и нелинейного распространения световых пучков в электрооптических кристаллах.

Перечень вопросов, подлежащих разработке:

1) Используя материал данного пособия и соответствующие (данной теме) источники литературы:

а) выбрать материал и функциональную схему построения требуемого электрооптического модулятора;

б) произвести обоснование выбранного конструктивного решения и материала модулятора.

2) Произвести расчет основных параметров и характеристик ЭОМ:

а) конструктивных размеров кристаллического образца;

б) величины начальных оптических потерь модулятора;

в) зависимостей поляризационных характеристик лазерного излучения на выходе модулятора от величины управляющего напряжения для разной ориентации плоскости поляризации входного излучения относительно кристаллофизических осей электрооптического кристалла.

- Выбрать конструкцию модулятора.

- Сделать выводы и заключение.

Решение: На основе краткой теории п.п. 8.1 – 8.2 (более подробно [см. 1, 7, 27 29 40])

Проводим:

Выбор материала ЭОМ. Критерии, позволяющие выбрать необходимый материал для построения ЭОМ: низкое поглощение на заданной длине волны, простота механической обработки конструктивного элемента, Электрооптические модуляторы на сегнетодиэлектриках, как правило, изготавливаются на основе кристалла ниобата лития $LiNbO_3$, обладающего хорошим сочетанием электрооптических свойств (рис.8.5).

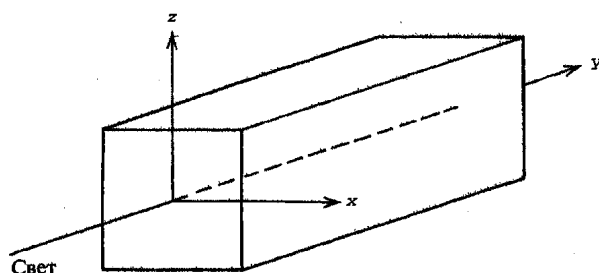


Рис. 8.5. Образец электрооптического кристалла $LiNbO_3$

Кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) относится к тригональной системе. В приложении (таблица Е.1) приведены соответствующие электрооптические коэффициенты для него.

Обоснование выбранного конструктивного решения и

материала модулятора. Анализ технического задания и литературы, по данному вопросу показывает, что в данном случае лучше использовать поперечное электрическое поле. Геометрия поперечного электрооптического модулятора приведена на рис. 8.6. Модулирующее поле приложено перпендикулярно относительно направления распространения оптического пучка, что позволяет обеспечить большую длину взаимодействия. Так как электрически индуцированное изменение фазы (или фазовая задержка) света, проходящего через кристаллическую пластинку, пропорционально величине EL , или UL/d (d – расстояние между электродами), то возможно создание электрооптических модуляторов лазерных пучков с низкими управляющими напряжениями.

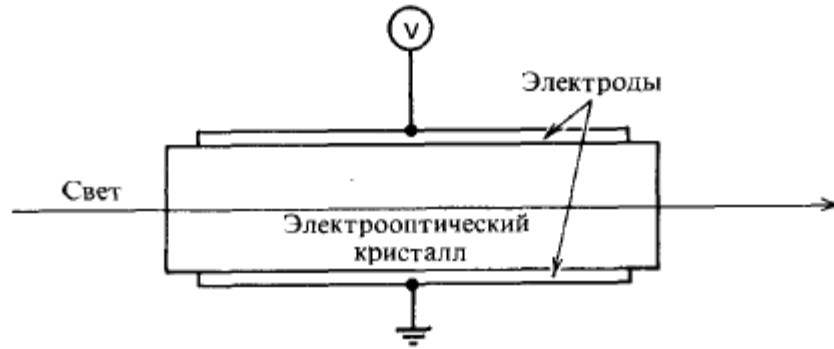


Рис. 8.6. Геометрия типичного поперечного электрооптического модулятора

Принцип построения модулятора излучения с использованием управляемого искусственного двулучепреломления иллюстрируется рисунком 8.7. Если поляризованное излучение лазера (рис. 8.7, а) падает на среду, обладающую двойным лучепреломлением (к которому приложено электрическое поле E_z так, что направление излучения не совпадает с оптической осью кристалла - вдоль оси z'), то в нем, с разной скоростью будут распространяться две волны, плоскости колебаний электрического вектора которых параллельны осям x' и y' оптической индикатрисы. Характер поляризации излучения на выходе из пластинки будет зависеть от разности фаз φ и от амплитуд $E_{x'}$, $E_{y'}$.

Соотношение амплитуд $E_{x'}$ и $E_{y'}$ зависит от угла α_1 между плоскостью колебаний электрического вектора \vec{E} , в падающем плоско-поляризованном излучении и осью x' (или осью y') оптической индикатрисы. Фазовая задержка линейно поляризованной световой волны с необыкновенной поляризацией определяется соотношением:

$$\Delta\varphi_e = k_0 \Delta n z = -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} E_0 z = -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{U}{d} L,$$

где k_0 – волновое число света в вакууме; $E_0 = \frac{U}{d}$; U – величина напряжения, приложенного к кристаллу; d – размер кристалла в направлении внешнего электрического поля; L – длина электродов в направлении распространения света. Соответственно для обыкновенно поляризованной волны величина фазовой задержки равна

$$\Delta\varphi_0 = -\frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{13} \frac{U}{d} L \quad (8.30)$$

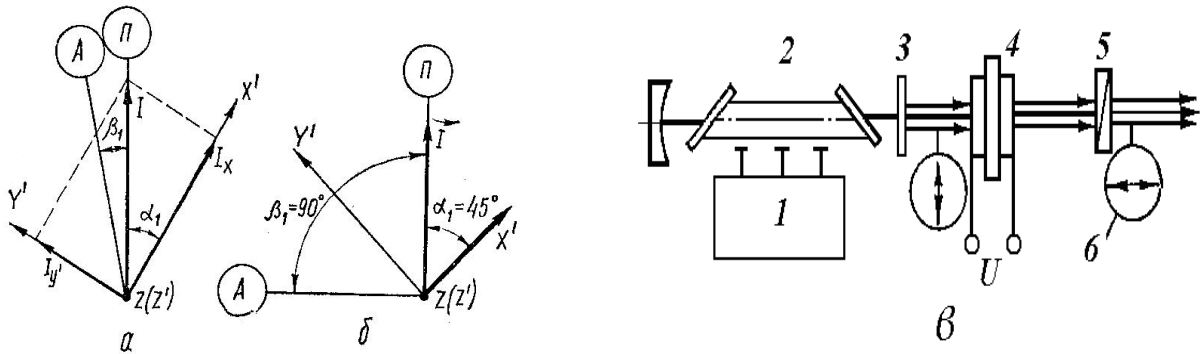


Рис.8.7. Взаимное расположение плоскостей поляризации излучения в элементах модулятора при произвольных углах α_1, β_1 (а); (б) - при $\alpha_1 = 45^\circ, \beta_1 = 90^\circ$ (z'' - плоскость поляризации поляризатора; z' - плоскость поляризации анализатора; z, z' - след плоскости колебания вектора \vec{E}); (в) - схема электрооптического модулятора излучения газового лазера: 1 - система накачки; 2 - газовый лазер; 3 - выходное зеркало резонатора; 4 - кристалл; 5 - анализатор; 6 - стрелками в кружках обозначено направление колебаний вектора \vec{E} .

Составляющие E_x и E_y взаимно перпендикулярны. При сложении двух колебаний, имеющих одинаковые амплитуды и разность хода $\lambda/4$, получаем так, называемое, *круговое колебание*. То есть излучение на выходе из кристаллической пластинки, к которой приложено напряжение, создающее разность хода в четверть волны, будет поляризованным по кругу.

При сложении колебаний с разностью хода $\lambda/2$ результирующее колебание будет снова плоскополяризованным, но плоскость поляризации его будет перпендикулярна относительно первоначальной. Следовательно, при подведении к кристаллу критического напряжения он будет поворачивать плоскость поляризации падающего на него излучения на угол $\pi/2$. В общем же случае при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний получаем эллиптическую поляризацию.

В случае, когда электрическое поле приложено вдоль оптической оси (с) кристалла, уравнение эллипсоида показателей преломления изменится.

Длины новых полуосей выразятся, как

$$n_x = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E, \quad (8.31)$$

$$n_y = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E, \quad (8.32)$$

$$n_z = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E, \quad (8.32)$$

где n_o и n_e – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления соответственно. Главные оси нового эллипсоида показателей преломления остаются неизменными.

Заметим, что, когда электрическое поле направлено вдоль оси c , кристалл остается одноосно анизотропным. Для светового пучка, распространяющегося вдоль оси x , двулучепреломление равно

$$n_z - n_y = (n_e - n_o) - \frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E. \quad (8.33)$$

Величина этого двулучепреломления равна сумме естественного двулучепреломления $(n_e - n_o)$ и электрически индуцированного двулучепреломления $\frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E$. При этом фазовая задержка для света, проходящего через кристалл, определяется выражением

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) L - \frac{\pi}{\lambda} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) \frac{L}{d} U, \quad (8.34)$$

Если свет линейно-поляризован вдоль оси z , то изменение фазы, индуцированное внешним электрическим полем, равно

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{L}{d} U, \quad (8.35)$$

В амплитудном модуляторе на кристалле $LiNbO_3$, из-за наличия естественного двулучепреломления приходится применять фазовый компенсатор, который сдвигает фазу до тех пор, пока полная фазовая задержка (при отсутствии внешнего напряжения) не будет составлять нечетное число $\frac{\pi}{2}$. Кроме того,

входная и выходная грани кристалла должны быть параллельными друг другу, чтобы пучок претерпевал одинаковую фазовую задержку по всему поперечному сечению модулятора. В этом случае полуволновое напряжение запишется в виде

$$U_{\pi} = \frac{d}{L} \cdot \frac{\lambda}{n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}} \quad (8.36)$$

Коэффициент пропускания системы поляризованного света имеет вид:

$$T = \sin^2 \frac{\Gamma}{2} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U}{U_{\pi}} \right) \quad (8.37)$$

8.3. Результаты расчета основных параметров и характеристик модулятора

Расчет конструктивных размеров кристаллического образца. Расчет размеров кристаллического образца включает в себя расчет толщины (d) и длины электродов L (с помощью которых подаем напряжение на пластинку), а также расчет длины кристалла (l).

Толщина пластины (d) будет численно равна апертуре (ширине ввода) светового пучка. То есть $d=3\text{мм}$.

Для расчета длины электродов воспользуемся выражением (8.35) выразив из него L , получим

$$L = \frac{\pi \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot 3}{\pi \cdot 2,2^3 \cdot 30,8 \cdot 10^{-12} \cdot 1000} = 5,79\text{мм}$$

Для расчета длины кристалла (l), воспользуемся соотношением

$$\frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) l = 2\pi \cdot m, \quad (8.38)$$

где m -целое число. Подставив численные значения и приняв $m = 788$, получаем:

$$l = m \cdot \frac{\lambda}{n_o - n_e} = 788 \cdot \frac{633 \cdot 10^{-9}}{2,286 - 2,2} = 5,8\text{мм}$$

Расчет величины начальных оптических потерь модулятора.

Изменение фазы, индуцированное внешним электрическим полем, равно

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{633 \cdot 10^{-9}} \cdot 2,2^3 \cdot 30,8 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{5,79}{3} \cdot 1000 = 3,14 = 180^\circ.$$

При распространении излучения под углом 45° к направлению оптической оси и вектора напряженности поля E_z (направленном вдоль оси z) возникает разность фаз равная:

$$\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda}(n_0 - n_e) + \frac{\pi L}{\lambda}(n_0^3 r_{33} - n_0^3 r_{13})E_z = \frac{2\pi L}{\lambda}(n_0 - n_e) + \frac{\pi L}{\lambda}(n_0^2 r_{33} - n_0^3 r_{13})\frac{U}{d}$$

Для получения на выходе разности фаз между составляющими, равной $\lambda/2$, что соответствует повороту плоскости поляризации на угол $\pi - 2\alpha$, к кристаллу необходимо приложить полуволновое напряжение

$$U_\pi = U_{1/2} = \frac{633 \cdot 10^{-9} \cdot 3}{5,79(2,286^3 \cdot 30,8 \cdot 10^{-12} - 2,2^3 \cdot 8,6 \cdot 10^{-12})} = 1187B$$

Расчетный коэффициент пропускания: $T = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1000}{1187}\right) = 0,94$

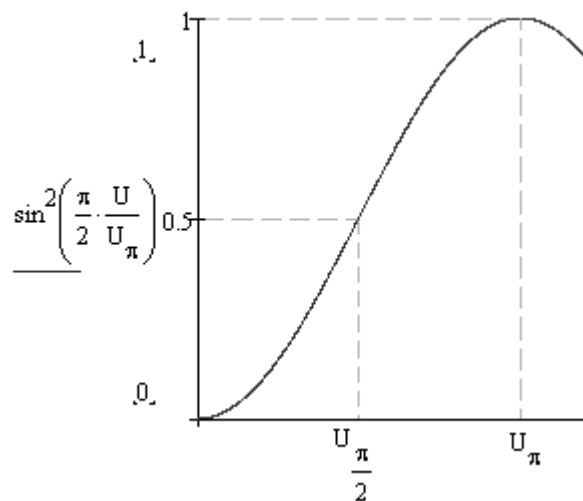


Рис.8.8. Зависимость коэффициента пропускания T электрооптического модулятора со скрещенными поляризаторами от приложенного напряжения.

Модулятор смещен в точку $\Gamma = \pi/2$, что приводит к коэффициенту пропускания 50%. Малое синусоидальное (приложенное) напряжение обеспечивает модуляцию интенсивности на выходе, относительно точки смещения.

Расчетные зависимости поляризационных характеристик лазерного излучения на выходе модулятора от величины управляющего напряжения для раз-

ной ориентации плоскости поляризации входного излучения относительно кристаллофизических осей кристалла приведены на рис. 8.9.

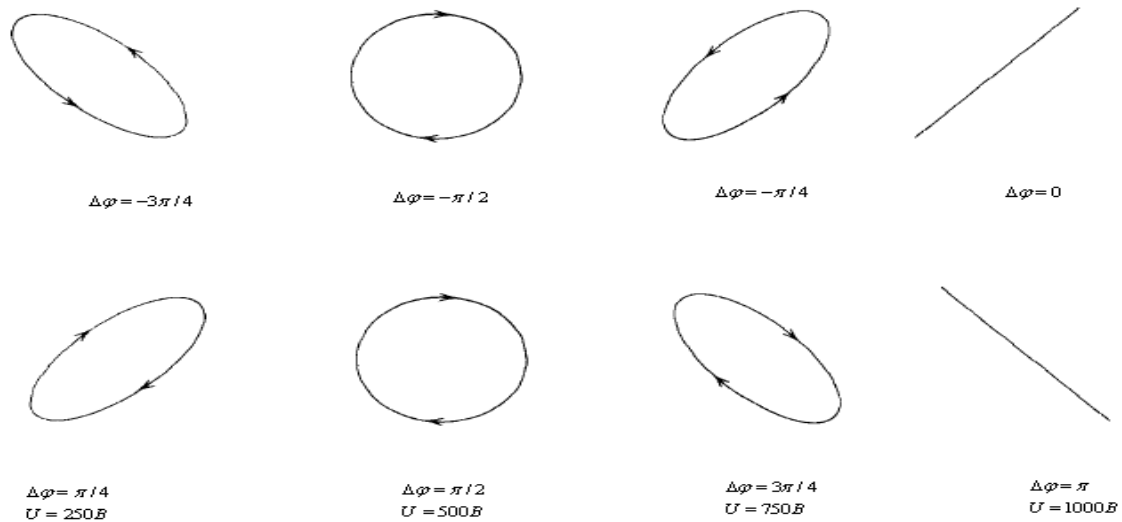


Рис. 8.9. Эллипсы поляризации при различных значениях фазы $\Delta\varphi$

8.4. Выводы.

В данной курсовой работе был смодулирован электрооптический модулятор для преобразования линейной поляризации световой волны в эллиптическую поляризацию с возможностью задания параметра эллиптичности. Длина кристалла $l = 5,8\text{мм}$; толщина кристалла $d = 3\text{мм}$; длина электродов $L = 5,79\text{мм}$; полуволновое напряжение $U_\pi = 1187B$; изменение фазы, индуцированное внешним электрическим полем $\Delta\varphi = \pi$; коэффициент пропускания $T = 0,94$.

Список рекомендуемых источников

1. Чернышев А.А. ОС ТУСУР 6.1-97 «Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления». Томск, 2002.
2. ГОСТ 7.1-84 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу (ССИБИД). Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления.
3. ГОСТ 7.9-95 ССИБИД. Реферат и аннотация.
4. ГОСТ 7.12-93 ССИБИД. Сокращения русских слов и словосочетаний в библиографическом описании произведений печати.
5. Бондаренко В. С. и др. Акустооптические модуляторы света / В.С. Бондаренко, В.П. Зоренко, В.В. Чкалова. – М.: Радио и связь, 1988.- 136 с.
6. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.- 616 с.
7. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М., «Сов. радио», 1977, 336 с.
8. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. М., «Сов. радио», 1978, 112 с.
8. Акустические кристаллы. Справочник/ под ред. Шаскольской М.П.
10. Таблица физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 1008 с.
11. Мустель Е.Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М., «Наука», 1970, с .296.
12. Пуговкин А.В., Серебренников Л.Я., Шандаров С.М. Введение в оптическую обработку информации. – Томск: Изд-во Томск. Ун-та, 1981. – 60с.
13. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики.- М.: Радио и связь, 1985. – 280 с., ил.

14. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени/ О.Б. Гусев, С.В. Кулаков, Б.П. Разживин, Д. В. Тигин; Под ред. С.В. Кулакова. – М.: Радио и связь, 1989. -139 с.: ил.
15. Голубков В.С., Евтихийев Н.Н., Папуловский В.Ф. Интегральная оптика в информационной технике. -М.: Энергоиздат, 1985, - 150 с.
16. Волноводная оптоэлектроника. Под ред. Т.Тамира.- М.: Мир, 1991, 574с.
17. Модуляторы и переключатели оптических сигналов 164–178 с. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус Систем, 1999, 657с.
18. Информационная оптика: Учебное пособие / Н.Н. Евтихийев, О.А. Евтихийева, И.Н. Компанец и др.; Под редакцией Н.Н. Евтихийева. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 612 с.
19. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.– 320 с.
20. Дж . Гауэр, Оптические системы связи. -М.: Радио и связь, 1989. – 504с.
ка информации. .– М.: Мир, 1984.–502с
21. Айхлер Ю., Айхлер Г.-И.Лазеры. Исполнение, управление, применение» Техносфера, -2008 г.
22. Тарасов Л.В. Физические основы квантовой электроники: Оптический диапазон. Изд.2.- » -URSS, -2010 г.
23. Пихтин А.Н. «Квантовая и оптическая электроника. Учебник».-М.: Абрикос, -2012.

Приложение А

Общетехнические требования к основным параметрам акустооптических модуляторов

- 1) Согласно [13] диаметр светового пучка D у реальных акустооптических модуляторов изменяется в диапазоне от 100 до 1000 мкм (19 точек); примем $D=100$ мкм;
- 2) Согласно [7] диаметр первого электрода у реальных акустоэлектронных устройств варьируется в пределах от 40 до 400 мкм. Тогда площадь этого электрода изменяется в следующих пределах от $1,3 \cdot 10^{-9}$ до $1,3 \cdot 10^{-7}$ м². Значит, длина электрода L_{electr} может изменяться в пределах от 1 мм до 20 мм; примем $L_{\text{electr}}=5$ мм;
- 3) Мощность акустической волны у реальных акустооптических модуляторов изменяется в пределах от 1 мВт до 1 Вт при этом минимальное значение этой величины определяется требуемой эффективностью дифракции, а максимальное – ограничивающими факторами;
- 4) Частота электрического сигнала у реальных акустооптических модуляторов варьируется в диапазоне от 10 МГц до 1000 МГц с целью минимизации потерь на более высоких частотах или 10 до 100 МГц;
- 5) Так как у реальных акустооптических модуляторов входное световое излучение имеет постоянную частоту (в данной работе $\lambda_0 = 0,63$ мкм) и мощность, примем мощность светового излучения равной 5 мВт, исходя из диапазона изменения выходной мощности гелий-неоновых лазеров в пределах от 2 до 10 мВт;
- 6) В реальных акустооптических модуляторах, работающих в режимах Рамана-Ната или Брэгга, в качестве рабочего максимума чаще всего используют первый, поэтому будем исследовать основные параметры и характеристики АОМ именно для этого порядка, то есть примем $m=1$;

- 7) Так как в качестве рабочего максимума будем использовать первый, то распределение интенсивности дифрагированного поля будем исследовать в области 2 см, то есть x будет изменяться от -1 см до 1 см;
- 8) Примем за частоту несущего электрического колебания 100 МГц, так как большинство реальных АОМ работают на этой несущей;
- 9) Толщина пьезослоя d_{piezo} у реальных преобразователей может изменяться в пределах от 0,2 до 200 мкм;
- 10) Толщина промежуточного (или согласующего) слоя может варьироваться в пределах от 0,3 до 3 мкм при этом этот же слой может быть использован в качестве второго электрода;
- 11) Толщина звукопровода определяется расходимостью звукового пучка в светозвукопроводе, а также диаметром светового пучка, поэтому будем считать, что толщина звукопровода равна (или больше) диаметру светового пучка, но при этом будем учитывать предельно допустимую величину толщины звукопровода из-за дифракционной расходимости акустической волны;
- 12) Будем считать, что радиотракт согласован с преобразователем и выходное сопротивление радиотракта равно 50 Ом;
- 13) Реальные акустооптические модуляторы потребляют не более 10 Вт, потребляемая электрическая мощность будет варьироваться от 1 мВт до 10 Вт;
- 14) Частотная зависимость потерь преобразования имеет ряд критических точек, в том числе и те, при которых данная функция обращается в бесконечность, поэтому будем считать, что в этих точках значение потерь преобразования равно 200 дБ.

Приложение Б

Геометрические параметры АОЯ

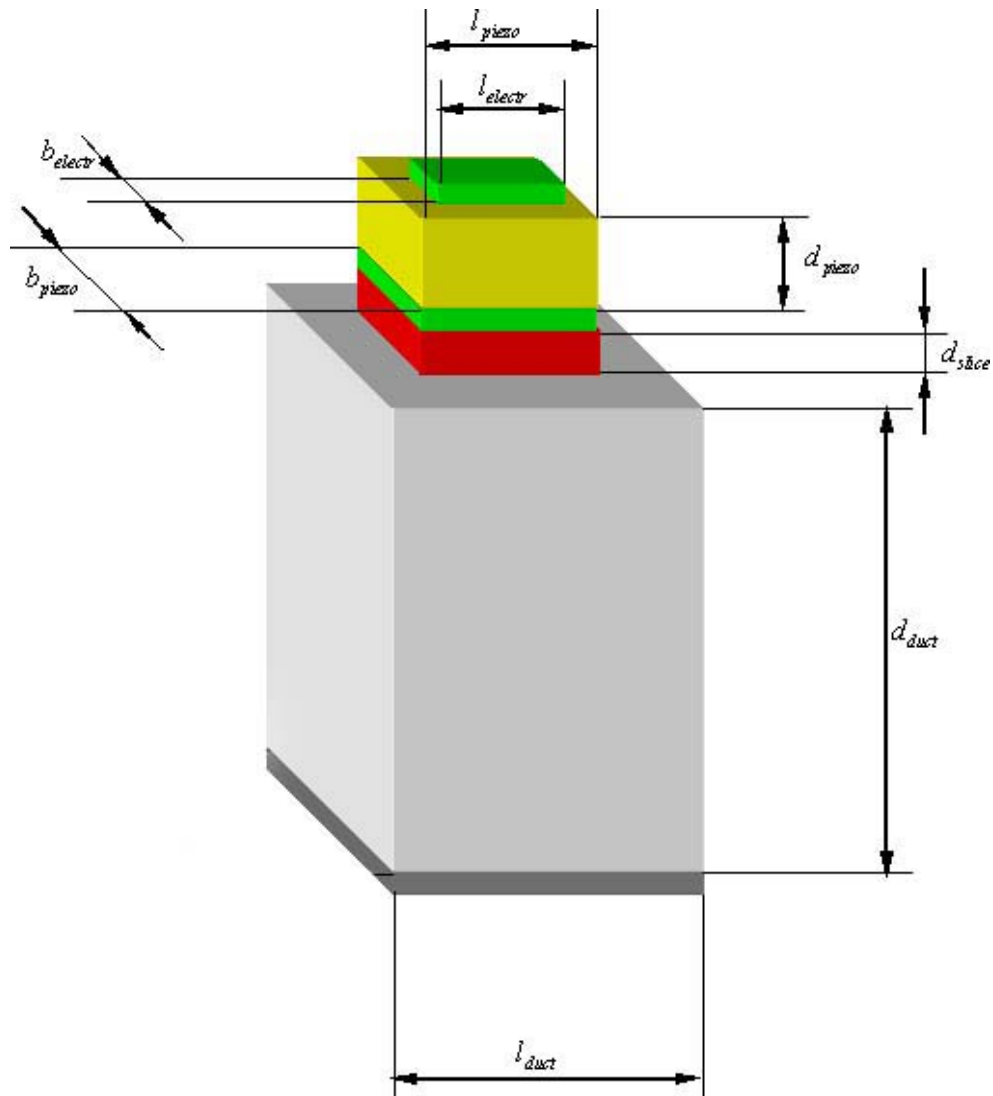


Рисунок 1 – Исследуемые геометрические параметры преобразователя акустических волн

2. Параметры исследуемого объекта:

2.1. Геометрические параметры (см. рис. 1)

а. для электрода:

- длина электрода l_{electr} ,
- ширина электрода b_{electr} ,

б. для пьезослоя:

- длина пьезослоя l_{piezo} (число),
- ширина пьезослоя b_{piezo} (число),
- толщина пьезослоя d_{piezo} (число),

в. промежуточного слоя:

- толщина промежуточного слоя d_{slice} (число, но если выбрана двухслойная структура, то сделать её неактивной),

г. для звукопровода:

- длина звукопровода l_{duct} (число),
- толщина звукопровода d_{duct} (число).

2.2. Выбор материалов для слоёв преобразователя

а. Пьезослой (выбор из списка: Ниобат лития, Плавленный кварц, Окись цинка)

б. Промежуточный слой (выбор из списка: Индий, Золото, Эпоксидная смола)

в. Звукопровод (выбор из списка: Вода, Плавленный кварц, Ниобат лития)

2.3. Параметры переключения

а. (выбор из списка: двухслойная структура или трёхслойная структура),

б. (выбор из списка: дифракция Рамана-Ната или дифракция Брэгга)

2.4. Параметры излучения лазера

а. диаметр пучка (число),

б. мощность излучения $\{P_0\}$ (число)

2.5. Параметры радиотракта

а. выходное сопротивление радиотракта (число),

б. выходное напряжение радиотракта (число),

в. диапазон частот радиосигнала (прокрутка)

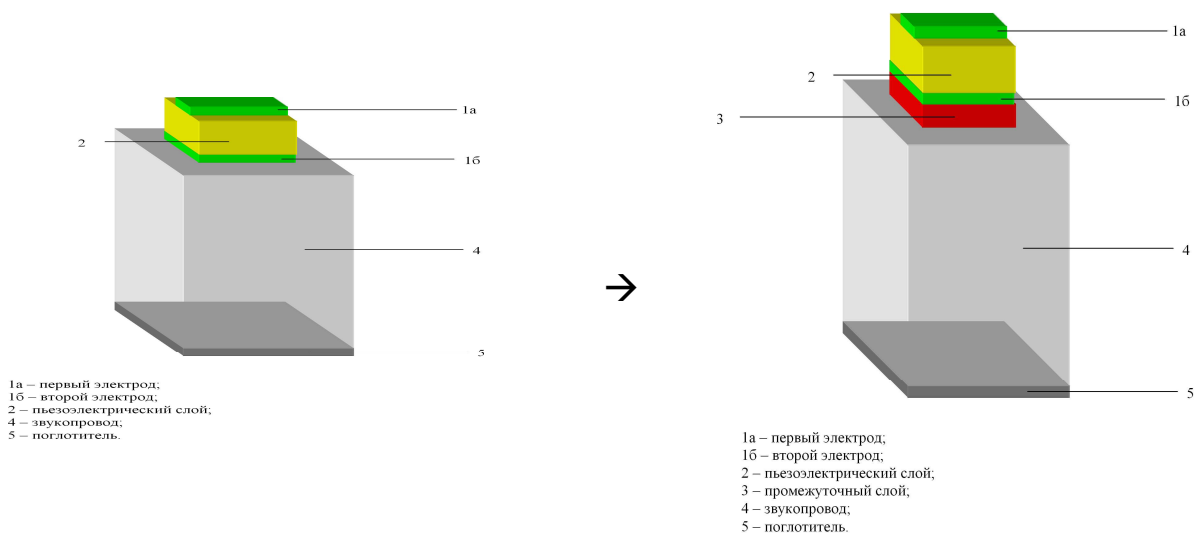
3. Свойства и характеристики исследуемого объекта

3.1. Числовые значения

а. Интенсивность лазерного излучения $\{I_0\}$,

б. Потребляемая электрическая мощность $\{P_{electr}\}$,

в. Частота основного акустического резонанса



Двухслойная структура

Вкладка

Трёхслойная структура

Приложение В

Свойства материалов для звукопровода

Таблица В1

Материал	Классе сизметрии (Вид сизметрии)	Тип УЗВ	Длина волны света λ_c , 10^6 м	Поляризация и направления распространения света	Диапазон прозрачности $\lambda_{\text{проз}}$, 10^6 м	Коэффициент оптического поглощения α_{opt} , Hn/m	Показатель преломления среды n_0	Плотность ρ , кг/м^3	Скорость распространения акустической волны в среде $v_{\text{ак}}$ м/с	Коэффициент акустического поглощения $\alpha_{\text{ак}}$ (или $\alpha_{\text{пл}}$, $\text{Hn/(м}\cdot\text{Гц)}$) (или $\text{Hn/(м}\cdot\text{Гц)}$) для жидкости)	Упругий коэффициент μ	Агрегатное состояние вещества	Коэффициент акустического качества $M_2 \cdot 10^{15}$, $\text{с}^2/\text{кг}$
Дистиллиро- ванная вода	Изо- тропная система	II	0,63	или ⊥	0,2-0,9 [9, с. 778]	1,5	1,33 [3, с. 370]	1000 [3, с. 370]	1500 [3, с. 370]	$24 \cdot 10^{15}$ [4, с. 172]	0,31 [3, с. 370]	жидкость	160
SiO_2 (плавленый кварц)	Изо- тропная система	II [7, с. 176]	0,63 [7, с. 176]	⊥ [7, с. 176]	0,2-4,5 [7, с. 176]	3,2 [4, с. 175]	1,46 [7, с. 176]	2200 [7, с. 176]	5960 [7, с. 176]	$6,9 \cdot 10^8$ [7, с. 176]	0,274	твёрдое тело	1,51
LiNbO_3 (ишобат лития)	3mm [7, с. 176]	II [7, с. 176]	0,63 [7, с. 176]	 [7, с. 176]	0,4-4,5 [7, с. 176]	2	2,29 [7, с. 176]	4700 [7, с. 176]	6570 [7, с. 176]	$0,0921 \cdot 10^8$ [7, с. 176]	0,255	твёрдое тело	7
ТФ-7 (тяжёлый флинт)	-	II [6, с. 102]	0,63 [6, с. с.102]	⊥ [6, с. 102]	0,4-2,6 [6, с. 102]	3,5	1,728 [6, с. 102]	4590 [6, с. 102]	3630 [6, с. 102]	$345 \cdot 10^8$ [6, с. 102]	0,203	твёрдое тело	3,2 [6, с. 102]

Таблица В2

Материал светозвук-пров.	Длина волны света $\lambda_{\text{св.}}$, мкм	Коэф. оптическ. поглощ. α , Нп/м	Показатель преломлен. среды, n_0	Плотность среды, ρ , кг/м ³	Скорость распространения акустич. волны, $v_{\text{ак}}$, м/с	Коэф. акустич. поглощ. $\alpha_{\text{ак}}$, Нп/М. Гц	Коэф. акустич. качества M_2 10^{-15} , с ³ /кг	Упругооптический коэфф. ρ	Агрегатное состояние среды
Дистиллированная вода	0,63	1,5	1,33	1000	1500	$24 \cdot 10^{-15}$	160	0,31	жидкая
SiO ₂ Плавленый кварц	0,63	3,2	1,46	2200	5960	$6,9 \cdot 10^{-8}$	1,51	0,274	тверд
LiNdO ₃ ниоблития	0,63	2	2,29	4700	6570	$0,0921 \cdot 10^{-8}$	7	0,255	тверд
ТФ-7 Тяжелый флинт	0,63	3,5	1,728	4590	3630	$345 \cdot 10^{-8}$	3,2	0,203	тверд
Стекло Пирекс	0,63	3,3	1,9	2224	5641	$\alpha f^2 = 54 \cdot 10^{-15}$, дБ/м	$M_2/M_1 = 0,77$	0,21	тверд
Ацетон:	0,63			7910	1174	$A = \alpha f^2 = 54 \cdot 10^{-15}$	$M_2/M_1 = 0,77$	0,11	жидкая

Приложение Г

Свойства материалов для промежуточного слоя

Материал	Тип УЗВ	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Скорость распространения акустической волны в среде $v_{\text{ак}}, \text{м/с}$	Коэффициент акустического поглощения $\alpha_{\text{ак}0}, \frac{\text{Нп}}{\text{м} \cdot \text{Гц}}$	Примечание
In (индий)	П	6900	2900	$24,2 \cdot 10^{-6}$	$d_{\text{slice}}=0,3\text{-}3\text{мкм}$
Au (золото)	П	18700	3400	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$d_{\text{slice}}=0,3\text{-}0,5\text{мкм}$ (при $d_{\text{electr}}=0,01\text{-}0,05\text{мкм}$ и $D_{\text{electr}}=40\text{-}400\text{мкм}$)
Эпоксидная смола	П	1100	2600	$50 \cdot 10^{-6}$	$d_{\text{slice}}=0,3\text{-}0,5\text{мкм}$
Ag (серебро)	П	10500	4700	$4,605 \cdot 10^{-6}$	$d_{\text{slice}}=0,3\text{-}0,5\text{мкм}$

Приложение Д

Свойства материалов для пьезопреобразователя (реальные параметры):

Центральная частота, МГц	Полоса частот, МГц	Временная выборка, мкс	Среда взаимодействия	Материал пьезопреобразователя	Число каналов	Дифракционная эффективность, %/Вт
100	50	30	TeO ₂	LiNbO ₃	1..20	50
100	10..40	30	стекло	LiNbO ₃	32	5
800	300	3	LiNbO ₃	ZnO	1..10	2
1400	400	1,5	LiNbO ₃	ZnO	1..20	2
1500	500	1	GaP	ZnO	1..10	2
1750	500	1,5	LiNbO ₃	ZnO	1..20	2

Свойства материалов для пьезопреобразователя

Таблица Д1

Материал Пьезопреобр.	Тип УЗВ(ультразвук. Волны)	Относительная Проницаем. Среды ϵ_r	Плотность ρ , кг/м ³	Кoeff. Электро-механ. связи, $K_{эл}$	Скорость Звука в среде, $v_{ак}$, м / с
Ниобат лития LiNbO ₃	Продольный	27,5	4640	0,17	7330
ВаTiO ₃ титонат бария	Продольный	1260	5700	0,384	5470
ZnO окись цинка	Продольный	4,58	2650	0,098	5720
PbMoO ₄ молибдат свинца	Продольный	26,8	6950	0,1	3750
Сульфид кадмия	Продольный	$\epsilon_r / \epsilon = 9,5$	5680	0,15	4460

Приложение Е

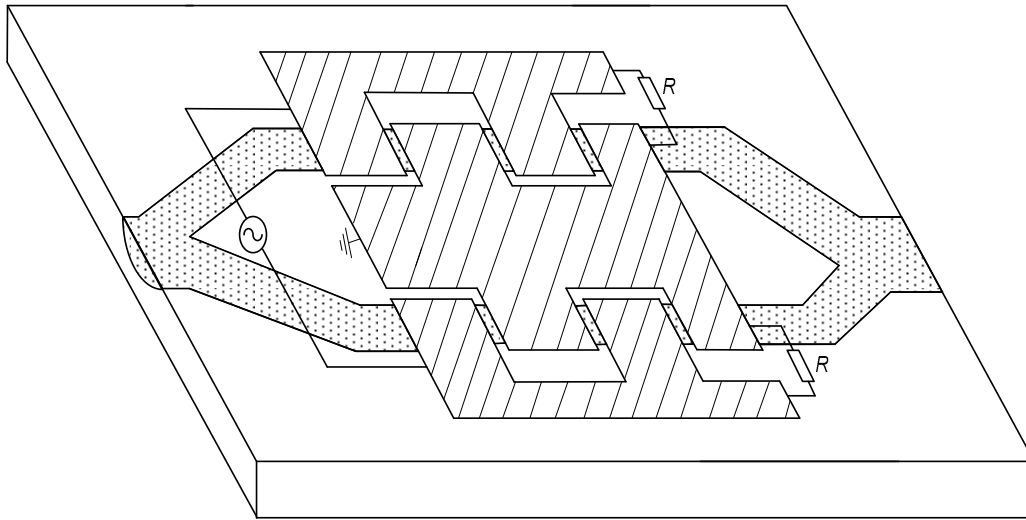
Материалы для электрооптических модуляторов

Таблица Е.1

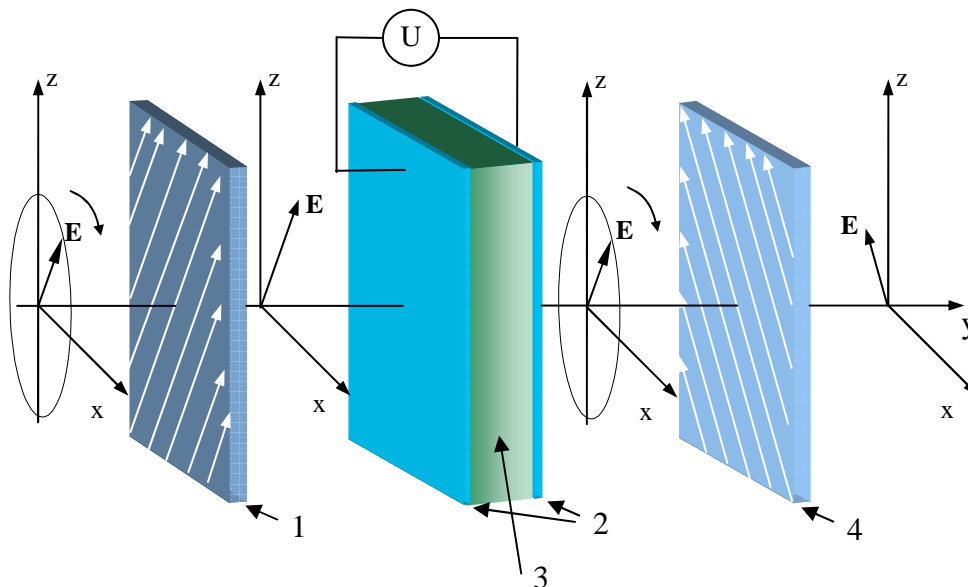
Вещество	Симметрия	Длина волны λ , мкм	Электрооптические коэффициенты $r_{ik}, 10^{-12} \text{ м / В}$	Показатель преломления	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_i (\epsilon_0)$
$LiIO_3$	6	0,633	$(S)r_{13} = 4,1$ $(S)r_{33} = 6,4$ $(S)r_{41} = 1,4$ $(S)r_{51} = 3,3$	$n_0 = 1,8830$ $n_e = 1,7367$	
$LiNbO_3$ ($T_c = 123$)	3m	0,633	$(T)r_{13} = 9,6$ $(S)r_{13} = 8,6$ $(T)r_{22} = 6,8$ $(S)r_{22} = 3,4$ $(T)r_{33} = 30,9$ $(S)r_{33} = 30,8$ $(T)r_{51} = 32,6$ $(S)r_{51} = 28$ $(T)r_c = 21,1$	$n_0 = 2,286$ $n_e = 2,200$	$(T)\epsilon_1 = \epsilon_2 =$ $(T)\epsilon_3 = 32$ $(S)\epsilon_1 = \epsilon_2 =$ $(S)\epsilon_3 = 28$
$LiTaO_3$	3m	0,633	$(T)r_{13} = 8,4$ $(S)r_{13} = 7,5$ $(T)r_{33} = 30,5$ $(S)r_{33} = 33$ $(T)r_{22} = -0,2$ $(S)r_{51} = 20$ $(T)r_c = 22$ $(S)r_{22} = 1$	$n_0 = 2,176$ $n_e = 2,180$	$(T)\epsilon_1 = \epsilon_2 =$ $(T)\epsilon_3 = 45$ $(S)\epsilon_1 = \epsilon_2 =$ $(S)\epsilon_3 = 43$
KH_2PO_4 (KDP)	$\bar{4}2m$	0,546	$(T)r_{41} = 8,77$ $(T)r_{63} = 10,3$	$n_0 = 1,5115$ $n_e = 1,4698$	$(T)\epsilon_1 = \epsilon_2 =$ $(T)\epsilon_3 = 21$
		0,633	$(T)r_{41} = 8$ $(T)r_{63} = 11$	$n_0 = 1,5074$ $n_e = 1,4669$	$(S)\epsilon_1 = \epsilon_2 =$ $(S)\epsilon_3 = 21$
		3,39	$(T)r_{63} = 9,7$ $(T)n_0^3 r_{63} = 33$		
$Ba_{0,25}Sr_0$ ($T_c = 395$)	44m	0,633	$(T)r_{13} = 67$ $(T)r_{51} = 42$ $(T)r_{33} = 1340$ $(S)r_c = 1090$	$n_0 = 2,3117$ $n_e = 2,2987$	$\epsilon_3 = 3400$ (15MГц)

Приложение Ж

Примеры некоторых конструкций ЭОМ



Интегрально оптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера



- 1 – поляризатор;
- 2 – прозрачные электроды;
- 3 – ЖК;
- 4 – анализатор.

Общий вид жидкокристаллического модулятора.

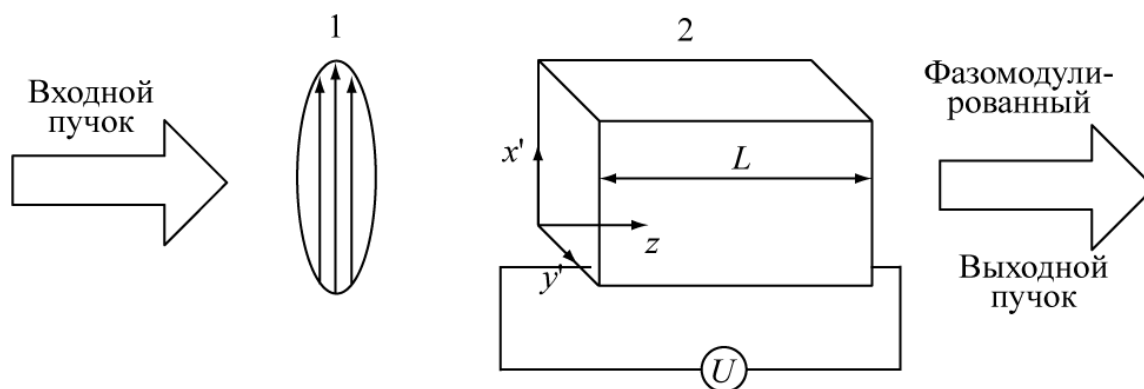


Схема электрооптического фазового модулятора. Ориентация кристалла и направление главных осей даны для KDP. Оптическая поляризация параллельна электрически индуцированной главной диэлектрической оси x' : 1 – поляризатор; 2 – электрооптический кристалл

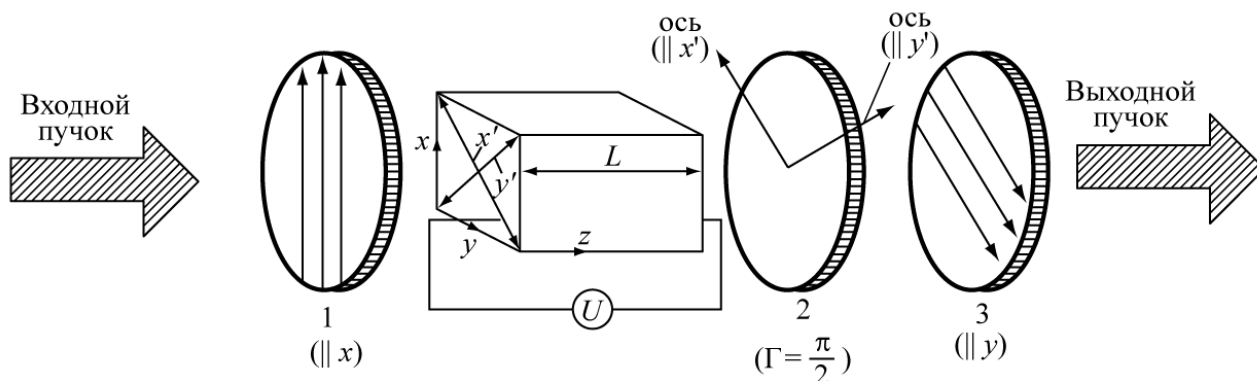


Схема типичного электрооптического амплитудного модулятора. Общая разность хода Γ есть сумма постоянной разности хода ($\Gamma_B = \pi/2$) в «четвертьволновой» пластине и разности хода, возникающей при распространении волны в электрическом кристалле: 1 – входной поляризатор; 2 – четвертьволновая пластинка ($\Gamma = \pi/2$); 3 – выходной поляризатор

Учебное издание

Г.Г.Куц, В.М.Шандаров

**Проектирование оптоэлектронных и квантовых
приборов и устройств**

Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 50 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.