

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ, ИНФОРМАТИЗАЦИИ И
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН
САМАРКАНДСКИЙ ФИЛИАЛ ТАШКЕНТСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

На правах рукописи
УДК 681.371

МАЖИДОВ ОТАБЕК АБДУМАЛИКОВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ ОПТИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

**5A111001 – Профессиональное образование (Информатика и
мультимедийные технологии)**

**Диссертация написанная для получения академической степени
магистра**

**Научный руководитель:
к.ф.-м.н., доцент А.Абдукаримов**

Самарканд – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
Глава I	Акустические волны и акустооптическое взаимодействие в кристаллах	10
1.	Акустические волны в кристаллах.....	10
2.	Влияние пьезоэффекта на упругие свойства кристаллов.....	13
3.	Акустооптическое взаимодействие в кристаллах.....	17
4.	Обзор литературных данных.....	23
	Заключение по главе I	29
Глава II	Акустооптические модуляторы света и их Параметры	31
1.	Акустооптические явления и их применение.....	31
2.	Акустооптические модуляторы света.....	34
3.	Конструкция акустооптического модулятора.....	37
4.	Параметры акустооптических модуляторов.....	39
	Заключение по главе II	42
Глава III	Результаты расчетов акустических параметров акустооптических модуляторов	44
1.	Акустооптические материалы и их основные свойства.....	44
2.	Описание анизотропии акустических свойств кристаллов с помощью характеристических поверхностей.....	52
3.	Общая структура программы расчета.....	57
4.	Вычисление спектра акустического сигнала.....	61
5.	Педагогический аспект полученных результатов.....	70
	Заключение по главе III	82
	Техника Безопасности.....	83
	Заключение	94
	Список используемой литературы	96
	Приложение	102

ВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники и всего мирового сообщества в наши дни невозможно представить без информационных технологий: «Глубоко возрастает роль знаний, информации в общественном развитии. Мы являемся свидетелями становления информационного общества, информационной цивилизации» [1]. В своем докладе на совместном заседании Законодательной палаты и Сената Олий Мажлиса Республики Узбекистан 12 ноября 2010 года Президент страны И.А. Каримов выразил мысль о том, что: «Обеспечение свободы и прав граждан в информационной сфере, включающие в себя такие составляющие, как свобода и реализация прав на получение, распространение информации и собственных идей, является краеугольным камнем основ построения демократического общества в Узбекистане». Президент подчеркнул также, что «необходимо широкое использование в системе государственного и общественного строительства современных информационно-коммуникационных технологий, играющих все более важную роль в процессах политической модернизации» [2].

Актуальность темы. В настоящее время в оптических системах передачи данных для преобразования оптических сигналов широко используются акустооптические модуляторы и другие подобные устройства, использующие явление дифракции света на акустических волнах. В качестве рабочей среды, где происходит это акустооптическое взаимодействие, применяются самые различные материалы, в том числе акустооптические добротные кристаллы, которые обладают хорошими фотоупругими свойствами. При этом, основные характеристики акустооптических устройств, такие как дифракционная эффективность и потребляемая мощность, в первую очередь определяются свойствами среды, в которой осуществляется взаимодействие оптических волн с акустическими волнами.

Таким образом, наиболее важными критериями при выборе материала, используемого в качестве среды взаимодействия света и звука, являются такие параметры, как коэффициент акустооптического качества, скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн в материале.

Применение информационных технологий, в том числе компьютерных расчетов и моделирования для определения всех этих параметров позволяет проводить автоматизированную обработку результатов исследований и, осуществлять легкий доступ к ним при необходимости. Следует отметить также высокую скорость производства математических операций и возможность представлять результаты в виде, удобном для их интерпретации. В целом, информационные методы предоставляют исследователю возможность наиболее эффективно решать поставленные задачи, и с высокой достоверностью определять характеристики акустооптических модуляторов.

Таким образом, решаемая в данной работе проблема определения акустических параметров акустооптических модуляторов является актуальной и с практической точки зрения. Методы компьютерных вычислений, использованные в данной работе, позволили с большой точностью определить ориентационные зависимости основных характеристик распространения акустических волн в кристаллах, используемых в качестве рабочих сред в акустооптических модуляторах.

Цель исследования: С помощью информационных технологий установление ориентационных зависимостей акустических параметров акустооптических модуляторов, для обеспечения их максимальной эффективности и их применение в процесс обучения.

Основные задачи исследования: Изучение основных закономерностей распространения акустических волн и основных характеристик акустооптического взаимодействия в кристаллах.

1. Определение ориентационных зависимостей характеристик распространения акустических волн в кристаллах, с учетом влияния пьезоэлектрического эффекта на упругие свойства кристаллов.
2. Описание характера и степени анизотропии затухания акустических волн в кристаллах в виде характеристических поверхностей акустического затухания;
3. Выявление наиболее выигрышных направлений распространения акустических волн в кристаллах LiNbO_3 , и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, применяемых в акустооптических модуляторах света.

Объект и предмет исследований. Объектом исследования является анизотропия скорости и затухания акустических волн и ее проявления в эффективности акустооптических модуляторов оптических сигналов.

Предметом исследования являются характеристики распространения акустических волн в кристаллах германата висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) и Ниобата лития (LiNbO_3), обладающих высокой акустооптической добротностью и применяемых в качестве рабочей среды в акустооптических модуляторах.

Методы исследований: исследования характеристик распространения акустических волн проводились методом компьютерного моделирования и расчетов на основе известных уравнений теории упругости и программы, разработанной на MATLAB.

Научная новизна работы.

1. Рассчитаны ориентационные зависимости скорости распространения и коэффициента затухания высокочастотных акустических волн в кристаллах LiNbO_3 , и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ в различных кристаллографических плоскостях
2. Выявлена анизотропия скорости распространения и коэффициента затухания в исследованных кристаллах, которая для наглядности представлена в виде сечений характеристических поверхностей.

3. Установлены направления распространения акустических волн в кристаллах LiNbO_3 , и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, вдоль которых величина коэффициента затухания акустических волн минимальна.

Практическая значимость работы.

- Определены параметры акустических волн, которые будут полезны при расчете и конструировании акустооптических модуляторов, применяемых в современных системах передачи данных.
- Предложены возможные варианты применения кристаллов Ниобата лития и германата висмута в акустооптических модуляторах оптических сигналов

Структура и объем выпускной квалификационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 86 страницах машинописного текста и содержит также 13 иллюстраций, 12 таблиц и список использованной литературы из 60 наименований.

В первой главе приведена теория распространения акустических волн и акустооптического взаимодействия в кристаллах и приведен обзор экспериментальных исследований данного явления в кристаллах. Во второй главе рассмотрены акустооптические явления, принцип работы и конструкция акустооптических модуляторов света. Представлены также основные параметры акустооптических модуляторов.

В третьей главе представлены расчетные формулы, методика определения анизотропии коэффициента затухания и скорости распространения акустических волн и результаты проведенных расчетов. В четвертой главе приводятся основные положения техники безопасности при работе с оборудованием и источниками оптического излучения. В заключении сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

Основные результаты работы:

1. Проведен обзор литературных работ, в которых проведены исследования анизотропии упругих свойств кристаллов. Показано, что задачи, разрабатываемые в работе с помощью компьютерных методов вычисления, являются актуальными и результаты исследования будут полезными при разработке акустооптических модуляторов.
2. Рассмотрены акустооптические явления и приборы, принцип работы которых основан на акустооптической дифракции. Представлены принцип действия, конструкция и основные рабочие параметры акустооптических модуляторов света.
3. Представлен обзор свойств основных акустооптических материалов, применяемых в качестве рабочих сред в акустооптических модуляторах и других акустооптических приборах
4. Показано, что важными критериями при выборе фотоупругой среды, наряду с коэффициентом акустооптического качества, являются скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн в материале.
5. Установлены направления распространения акустических волн в кристаллах LiNbO_3 , и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, вдоль которых величина затухания акустической волны минимальна, а акустооптическая добротность максимальна.
6. Показано, что наибольшая анизотропия затухания в кристаллах LiNbO_3 имеет место для не пьезоактивных поперечных акустических волн, поляризация которых перпендикулярна плоскости сечения.
7. Рассчитанные параметры могут быть использованы при расчете и конструировании акустооптических модуляторов, применяемых для управления и преобразования оптических сигналов в современных системах передачи данных.

Заключение и рекомендации: В диссертационной работе с помощью информационных технологий установлены ориентационные зависимости скорости распространения и коэффициента затухания акустических волн в кристаллах ниобата лития и германата висмута, используемых в качестве рабочей среды в акустооптике. Полученные результаты позволяют осуществить выбор оптимального среза (кристаллографического направления) для обеспечения максимальной эффективности работы акустооптических модуляторов на этих кристаллах.

При конструировании акустооптических модуляторов на кристаллах ниобата лития рекомендуется использовать срез (001) (направление $\langle 001 \rangle$), для продольных акустических волн и срез, перпендикулярный кристаллографическому направлению $\langle 011 \rangle$ для поперечных волн.

Опубликованные работы. Основные результаты выпускной квалификационной работы опубликованы в следующих изданиях:

1. Ахмеджанов Ф.Р., Саидвалиев У.А., Мажидов О. Акустические свойства кристаллов, применяемых в акустооптических коммутаторах и модуляторах. Материалы научно-практической конференции: Сборник «Замоновий ахборот-коммуникация технологиялари», Самарканд, 2012 г. С. 65-68.
2. Ахмеджанов Ф. Р., Мажидов О. Методика изучения дифракции света на ультразвуке с применением векторных диаграмм. Материалы конференции СВАКУ, 2013 г.
3. Мажидов О. «Анизотропия акустического затухания в кристаллах, применяемых в акустооптических модуляторах» Сборник ГАТУ Самарканд филиали “Замонавий ахборот – коммуникация технологиялари “Мустаҳкам оила йили” Давлат дастури асосида ўтказилган талаба ва магистрантларнинг VII илмий-амалий конференцияси материаллари туплами. Самарқанд (2012 йил, 25-27 апрель)
4. Ахмеджанов Ф.Р., Мажидов О.А., Холов Х. «Акустооптические свойства кристаллов, применяемых в акустооптических преобразователях » Сборник

ТАТУ Самарқанд филиали талаба ва магистрантларнинг VIII илмий-амалий конференциясининг материаллари.

ГЛАВА 1. АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В КРИСТАЛЛАХ

1. Акустические волны в кристаллах

В этом разделе рассмотрены основные сведения о распространении акустических волн в кристаллах и их основных характеристиках, которые определяют их применение в акустооптических модуляторах. Теория распространения объемных акустических волн в линейной анизотропной среде в настоящее время хорошо разработана, и ее изложение можно найти в ряде монографий и учебных пособий [3-11]. Рассмотрим те ее основные положения и соотношения, которые потребуются нам в дальнейших исследованиях.

Рассмотрение это надо начинать с известного обобщённого линейного закона Гука, который связывает тензор деформации $U_{kl} = \partial U_k / \partial x_l$ (U_k – компоненты вектора смещения) с тензором напряжения σ_{ij} , и имеет вид

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot U_{kl} \quad (1.1)$$

где C_{ijkl} – компоненты материального тензора четвертого ранга, называемого тензором упругих постоянных (компоненты этого тензора также часто называют модулями упругости второго порядка).

Подставляя (1.3) в уравнение движения для элемента объема твердого тела (уравнение Коши):

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2}, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность тела, получаем волновое уравнение, то есть уравнение эластодинамики, которое описывает распространение объемных акустических волн в кристаллах [4-8]:

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_j \partial x_e} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (1.3)$$

Отметим, что во всех тензорных выражениях индексы i, j, k, l пробегает значения 1, 2, 3 и применяется правило суммирования по повторяющимся индексам. [6].

Во многих задачах акустики в качестве решения уравнения (1.5) используется приближение плоской однородной гармонической волны, которое в материальной среде описывается полем вектора смещения [3, 47]:

$$\vec{U}(r, t) = A \cdot \vec{\gamma} \cdot \exp[i \cdot (q \cdot \vec{r} - \omega \cdot t)], \quad (1.4)$$

где A - амплитуда волны, $\vec{\gamma}$ - единичный вектор поляризации, $\vec{q} = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot \vec{\kappa}$ - волновой вектор волны, $\vec{\kappa}$ - единичный вектор волновой нормали.

Подставляя (1.6) в (1.5) и проводя дифференцирование, получаем систему алгебраических уравнений:

$$C_{ijkl} \kappa_j \kappa_k \gamma_e = \rho \cdot V^2 \cdot \gamma_i \quad (1.5)$$

или в матричном виде уравнения Грина-Кристоффеля

$$(\Gamma_{ik} - \rho \cdot V^2 \cdot \delta_{ik}) \cdot \gamma_k = 0, \quad (1.6)$$

где $\Gamma_{ik} = C_{ijkl} \kappa_j \kappa_e$ - тензор Кристоффеля, V - фазовая скорость волны, δ_{ik} - единичный тензор Кронекера, а γ_k - компоненты единичного вектора поляризации, удовлетворяющие условию $\gamma_i \gamma_i = 1$.

Дисперсионное уравнение при этом имеет вид [3, 4]:

$$|\Gamma_{ik} - \rho \cdot V^2 \cdot \delta_{ik}| = 0 \quad (1.7)$$

Как следует из (1.8), свойства объёмных акустических волн определяются свойствами и симметрией тензора Кристоффеля, который в отсутствие диссипации вещественен, симметричен и положительно определен. Собственные значения этого тензора определяют пространственный спектр фазовых скоростей акустических волн, а собственные векторы - их поляризацию.

Как следует из теории матриц, существуют три положительных собственных значения тензора Γ_{ik} , которые соответствуют трём волнам, распространяющимся по одному и тому же направлению в кристалле. При этом собственные векторы, отвечающие этим собственным значениям, будут взаимно ортогональны.

Таким образом, зная матрицу упругих постоянных C_{ijkl} сравнительно легко определить значения фазовых скоростей V и компоненты поляризации γ_i трёх упругих волн, распространяющихся по заданному направлению k .

Более сложной является обратная задача - определение действительных компонент матрицы C_{ijkl} путём экспериментального измерения скоростей акустических волн. Если из условий симметрии матрица C_{ijkl} имеет n независимых компонент, то в этом случае необходимо подобрать такие кристаллографические направления в кристалле, чтобы можно было определить значения скоростей для n различных неэквивалентных волн.

Тогда составляется система из n нелинейных уравнений $V = f(C_{ijkl})$, решение которой и даёт искомые значения C_{ijkl} . При этом выбор указанных направлений в кристалле должен быть таким, чтобы комбинация упругих постоянных C_{ijkl} в выражении для искомым скоростей V_n позволяла определять не только модуль, но и знак каждой постоянной C_{ijkl} .

Как правило, такой выбор удается осуществить при исследовании кристаллов высших и средних классов симметрии. В настоящее время

существуют стандартные методы и программы на ЭВМ для отыскания собственных значений и собственных векторов матриц при условии, что известны все независимые компоненты матрицы упругих модулей. Однако до настоящего времени эти методы хорошо разработаны только для кристаллов кубической симметрии.

В этом случае упругие постоянные C_{11} , C_{12} и C_{44} кубического кристалла сначала определяются с помощью измеренных значений скоростей продольных (V_L) и поперечных (V_S) звуковых волн, при их распространении вдоль осей симметрии 2-го (ось $\langle 110 \rangle$) и 4-го (ось $\langle 100 \rangle$) порядка. Затем определенные таким образом значения упругих постоянных используются для нахождения компонент тензора Кристоффеля и решения дисперсионного уравнения (1.9) для выбранного направления распространения акустической волны.

Для нахождения компонент тензора упругих модулей C_{ijkl} в кристаллах более низкой симметрии необходимо пользоваться численными методами решения на ЭВМ, предварительно разработав специальную программу расчета. При этом необходимо учитывать экспериментальные погрешности в определении величин, которые используются в качестве исходных параметров при вычислении с помощью специальной программы характеристик распространения акустических волн в акустооптических кристаллах.

2. Влияние пьезоэффекта на упругие свойства кристаллов

Как правило, в кристаллах низкой симметрии отсутствует центр симметрии, что означает у них наличие пьезоэффекта. При распространении акустических волн в таких средах, возникают особенности, которые в настоящее время хорошо изучены в литературе [8-10]. Следуя этим работам, можно выявить основные закономерности распространения акустических волн в кристаллах, обладающих пьезоэффектом.

В квазистатическом приближении для исследования распространения акустических волн в пьезоэлектрическом кристалле (в рамках линейной теории), необходимо рассмотреть решение связанной системы уравнений эластодинамики и электростатики [5-8]:

$$1. \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \quad (1.8)$$

$$2. \sigma_{ik} = C_{iklm} \cdot \frac{\partial U_l}{\partial x_m} \quad (1.9)$$

$$3. \frac{\partial D_m}{\partial x_m} = 0 \quad (1.10)$$

$$4. D_m = \varepsilon_{mn} E_n \quad (1.11)$$

$$5. \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (1.12)$$

где E_n – компоненты вектора напряженности электрического поля, D_m – компоненты вектора электрической индукции, ε_{mn} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости.

Уравнения (1.9 - 1.12) тождественно удовлетворяются, если положить:

$$U_{lm} = \frac{\partial U_l}{\partial x_m} \text{ и } E = -\operatorname{grad} \varphi.$$

В пьезоэлектрических кристаллах всякое изменение электрического состояния изменяет его механическое состояние, и наоборот, и эти изменения должны подчиняться соответственно уравнениям электростатики и теории упругости. В результате, если в качестве термодинамического потенциала рассматривать электрическую энтальпию [3], приходим к системе уравнений, которая имеет вид [3]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^{E,S} \cdot U_{kl} - e_{nij}^S \cdot E_n \quad (1.13)$$

$$D_m = e_{mkl}^S \cdot U_{kl} + \varepsilon_{nm}^{S,U} \cdot E_n \quad (1.14)$$

где e_{mkl} - компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов.

Подставляя (1.13) в (1.10) и (1.14) в (1.12), получаем систему уравнений, которая для плоских однородных волн смещений и потенциала, записываемых в виде:

$$U_j = A\gamma_j \exp[i(\omega t - \vec{q}\vec{r})]$$

$$\varphi = A\varphi_0 \exp[i(\omega t - \vec{q}\vec{r})]$$

дает систему алгебраических уравнений

$$\rho v^2 U_j = C_{ijkl}^E \kappa_i \kappa_e U_k + e_{kij} \kappa_i \kappa_k \varphi \quad (1.15)$$

$$E_{mn} \kappa_m \kappa_n \varphi = e_{mkl} \kappa_m \kappa_e U_k$$

Исключив из системы (1.15) потенциал:

$$\varphi = \frac{e_{mkl} \kappa_m \kappa_e}{E_{mn} \kappa_m \kappa_n} U_k \quad (1.16)$$

получаем уравнения Грина-Кристоффеля [51, 53]:

$$\langle \Gamma_{ik} - \delta_{ik} \rho V^2 \rangle \gamma_k = 0 \quad (1.17)$$

где вместо тензора Кристоффеля Γ_{ik} стоит симметричный тензор Π_{ik}

$$\Pi_{ik}^E = \Gamma_{ik}^E + K_{ik}^E = \Gamma_{ik}^E + \frac{e_{kij} \kappa_j \kappa_k e_{mkl} \kappa_m \kappa_e}{\varepsilon_{mnl} \kappa_m \kappa_n}, \quad (1.18)$$

Этот тензор определяет скорости и поляризацию упругих волн в пьезоэлектрическом кристалле, так же, как тензор Γ_{ik} в случае отсутствия пьезоэффекта.

Очевидно, что свойства упругих волн не зависят от выбора координат [3, 53] и, следовательно:

$$\Pi_{ik} = \Pi_{ik}^E = \Pi_{ik}^D.$$

Полученные соотношения позволяют проанализировать структуру связанных электроакустических волн в пьезоэлектриках. Из условия $E = -grad\varphi$ для однородных плоских волн получим, что, независимо от поляризации упругой волны, она может сопровождаться (при $e_{mkl} \neq 0$) волной продольного электрического поля [3, 54]

$$E_n = -\frac{e_{mkl} \kappa_m \kappa_e}{\varepsilon_{mnl} \kappa_m \kappa_n} \cdot \frac{\partial U_k}{\partial x_n} \quad (1.19)$$

При этом легко показать, что вектор \vec{D} будет всегда перпендикулярен волновой нормали упругой волны [3, 4]. Действительно, подставляя (1.21) в (1.16), находим, что скалярное произведение

$$D_m \kappa_m = q e_{mkl} \kappa_m \kappa_e U_k - q e_{mkl} \kappa_m \kappa_e U_k = 0 \quad (1.20)$$

где q - модуль волнового вектора. Учитывая, что

$$\vec{D} = \vec{E} + \vec{P},$$

где \bar{P} – вектор электрической поляризации, получаем, что, в общем случае, эти векторы располагаются относительно вектора q определенным образом.

Волны, для которых реализуется условие $\bar{D} = 0$, называют продольно-пьезоактивными. В этом случае, как видно из (1.22), скорости будут определяться модулями C_{ijkl}^D , которые, как видно из (1.15) и (1.16), будут больше C_{ijkl}^E . Таким образом, имеет место ужесточение кристалла, обусловленное пьезоэлектрическим полем. Если реализуется случай $\bar{E} = 0$, то упругая волна сопровождается волной электрической индукции и такие волны называют поперечно-пьезоактивными. В этом случае "ужесточение" не происходит, и скорости определяются модулями C_{ijkl}^E .

В современных акустооптических системах используются акустические волны с высокими частотами ($10^9 - 10^{11}$ Гц). При этом длина волны звука Λ имеет тот же порядок величины, что и длина волны света λ . Для таких высокочастотных акустических волн необходимо пользоваться более строгой электродинамической теорией [3, 4] и решать совместно систему уравнений состояния для пьезоэлектрических кристаллов (1.13), (1.14), уравнение движения (1.8) и полную систему уравнений Максвелла. Однако для многих практических случаев достаточно пользоваться уравнениями, приведенными в данном разделе.

3. Акустооптическое взаимодействие в кристаллах

Акустооптическое взаимодействие представляет собой взаимодействие света с акустическими волнами, и возникает в материальной среде вследствие эффекта фотоупругости, заключающееся в изменении диэлектрической проницаемости и показателя преломления среды под действием упругих деформаций, индуцируемых акустической волной [3-6].

При распространении акустической волны, в среде образуются периодические слои с отличающимся показателем преломления. Эти слои движутся со скоростью звука и следуют друг за другом на расстоянии

половины длины звуковой волны. При прохождении света через такую слоистую структуру возникает дифракция (рис. 1.1).

Различают два вида (режима) дифракции, отличающиеся разными дифракционными спектрами: Рамана - Ната и Брэгга. Дифракция Рамана - Ната наблюдается на низких звуковых частотах и при небольшой длине взаимодействия. При нормальном падении света, т. е. параллельно волновому фронту звука, дифракционный спектр Рамана - Ната представляет расположенные симметрично по обе стороны от прошедшего пучка равноотстоящие друг от друга дифракционные максимумы.

Угловое направление дифракционных максимумов (рис. 1.1) относительно нулевого (соответствующего прошедшему свету) определяется формулой $\sin\theta_m = m\lambda/\Lambda$, $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, где θ_m - угловое направление на дифракционный максимум m -го порядка; λ - длина световой волны в веществе; Λ - длина звуковой волны. Знак плюс соответствует максимумам, которые расположены с той стороны, куда отражается свет от фронтов звуковой волны. Частота света в m -м максимуме сдвинута относительно частоты ω падающего света на величину, пропорциональную акустической частоте Ω , и равна $\omega + m\Omega$.

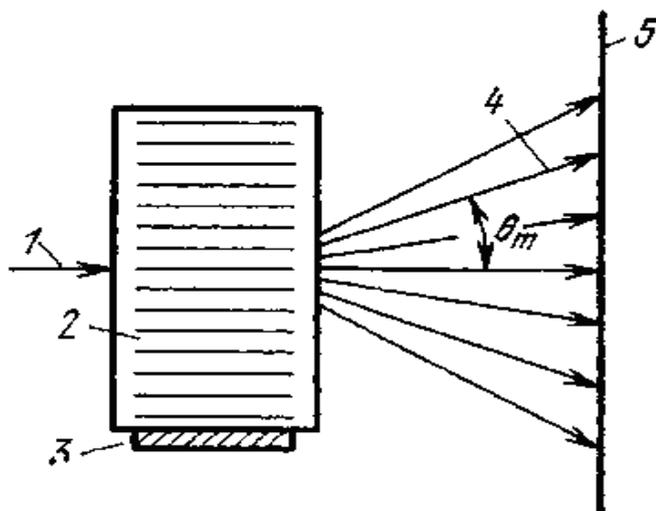


Рис. 1.1. *Ход лучей при дифракции Рамана — Ната при нормальном падении света:*

1 — падающий свет; 2 — звуковая волна; 3 — пьезопреобразователь; 4 — дифракционный максимум m -го порядка; 5 — экран.

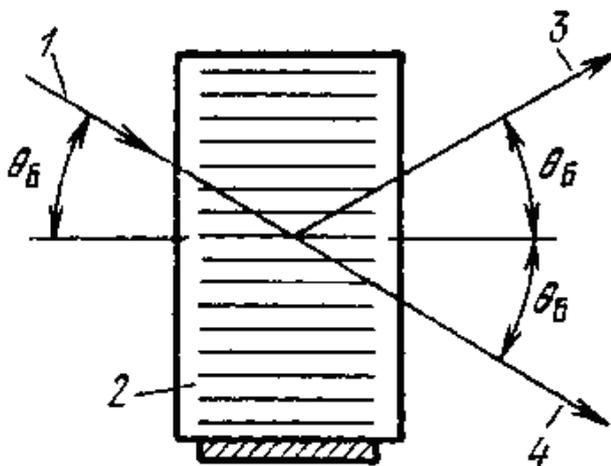


Рис. 1.2. Ход лучей при дифракции Брэгга:

1 — падающий свет; 2 — звуковая волна; 3 — дифрагированный свет;
4 — прошедший свет.

О дифракции Брэгга говорят в том случае, когда дифракционный спектр состоит из двух максимумов, соответствующих значениям $m=0$ и $m=1$ (рис. 1.2). Дифракционные максимумы минус первого и высших порядков отсутствуют. Интенсивность первого максимума будет наибольшей, если свет падает под углом к волновому фронту акустической волны, удовлетворяющим условию Брэгга, которое выводится из закона сохранения энергии при акустооптическом взаимодействии:

$$\sin\theta_B = \lambda/2\Lambda \quad (1.21)$$

Угол θ_B , определяемый выражением (1.1), называется углом Брэгга. Дифракция Брэгга имеет место на высоких частотах при большой длине взаимодействия света с акустической волной.

Физическая интерпретация этих двух различных типов дифракции состоит в следующем. При неизменной длине волны света на низких звуковых частотах при малой длине взаимодействия (длине акустического столба) направление распространения падающего света внутри области взаимодействия остается прямолинейным и оптическая неоднородность среды, связанная с изменением показателя преломления, влияет только на фазу света, прошедшего через акустический столб. Для света роль акустической волны в этом случае сводится к созданию движущейся со скоростью звука фазовой решетки с периодом, равным периоду звуковой волны. Такая ситуация соответствует дифракции Рамана - Ната.

Дифракция света в режиме Рамана - Ната происходит по законам дифракции на обычной фазовой решетке, и именно этим объясняется наличие симметричных эквидистантно расположенных дифракционных максимумов. Частоты света в дифракционных максимумах сдвинуты согласно эффекту Допплера вследствие движения фазовой решетки.

При увеличении акустической частоты или длины взаимодействия направление распространения падающего света внутри акустического столба уже нельзя считать прямолинейным, а возникшую периодическую структуру — только фазовой решеткой. Свет испытывает как фазовые, так и амплитудные возмущения, и происходит постепенный переход от дифракции на фазовой решетке (дифракции Рамана - Ната) к рассеянию на объемной периодической структуре (дифракции Брэгга). В переходной области между режимами Рамана - Ната и Брэгга при падении света под углом Брэгга помимо первого максимума наблюдаются дифракционные максимумы высших порядков. Угловые направления этих максимумов относительно падающего света сохраняются такими же, как и при дифракции Рамана - Ната. Однако распределение интенсивностей становится асимметричным. Наибольшую интенсивность имеет Брэгговский (первый) максимум. Фотографии дифракционных спектров в переходной области при наклонном

падении света можно найти в [6, 8]. Наконец, на высоких частотах и при значительной глубине звукового поля акустооптическое взаимодействие целиком приобретает объемный характер, и происходит селективное отражение света под углом Брэгга от движущейся периодической структуры, созданной ультразвуковой волной.

Условия, при которых наблюдается тот или иной вид дифракции, были предметом исследований многих работ. Однако, когда в современной акустооптике заходит речь о критерии, разграничивающем дифракцию Рамана–Ната и дифракцию Брэгга, то обычно принимается, что наблюдаемый вид дифракции зависит от величины безразмерного параметра:

$$Q = 2\pi L\lambda / \Lambda^2, \quad (1.22)$$

где L — длина звукового столба.

При $Q \ll 1$ имеет место дифракция Рамана - Ната, при $Q \gg 1$ - дифракция Брэгга; значения $Q = 1$ соответствуют переходной области.

Как было показано в работе [3, 11] отмеченные условия являются слишком строгими, и практически, дифракция Рамана - Ната наблюдается уже при условии:

$$Q \leq 0,3, \quad (1.23)$$

а дифракция Брэгга при условии:

$$Q \geq 4\pi \quad (1.24)$$

Последнее условие означает, что падающий под углом Брэгга световой пучок пересекает две или более соседних плоскости с максимальной (минимальной) плотностью. Максимальное и минимальное значения

параметра Q , определяемые (1.23) и (1.24), обычно принимаются, соответственно, за верхний предел дифракции Рамана - Ната и нижний предел Брэгговской дифракции света на акустических волнах. Область, соответствующая значениям параметра Q от 0.3 до 4π , считается промежуточной между этими видами дифракции.

При этом необходимо сделать следующее замечание. Большинство акустооптических приборов, т. е. приборов, использующих явление дифракции света на акустических волнах, работает в режиме дифракции Брэгга (исключение составляют низкочастотные процессоры). Данный режим обладает целым рядом преимуществ, по сравнению с режимом Рамана – Ната и позволяет использовать в акустооптических приборах акустические волны гиперзвукового диапазона.

4. Обзор литературных данных

В работе [14] впервые был предложен способ представления ориентационной зависимости акустического затухания на примере кубических кристаллов MgO. Три независимых компоненты тензора c''_{iklm} в этих кристаллах определялись из измерений затухания продольных и двух поперечных волн при распространении вдоль направления $\langle 110 \rangle$.

На основании этих данных в работе [14] предложено использовать характеристическую поверхность - поверхность акустического затухания для описания анизотропии затухания акустических волн в кристаллах, и построено сечение поверхности акустического затухания плоскостью (001), полностью определяющее затухание акустических волн в любом направлении в данной плоскости.

Для проверки были проведены измерения затухания при распространении акустических волн вдоль разных направлений в плоскости

(001) кристаллов MgO и было получено хорошее соответствие между расчетом и экспериментом.

Таким образом, феноменологически затухание акустических волн можно описывать мнимой частью тензора упругих коэффициентов C_{iklm} или тензором вязкости η_{iklm} . Свойства симметрии и соответственно число независимых компонент этих тензоров такие же, как у действительной части тензора упругих коэффициентов C'_{iklm} , которые определяет скорость акустических волн.

В работе [15] аналогичные исследования были проведены для кристаллов ниобата лития. Эти кристаллы относятся к классу $3m$ и имеют 6 независимых компонент тензора c_{iklm} . Соответственно, для определения всех компонент тензора вязкости понадобилось шесть независимых измерений затухания.

В работе [16], на основании экспериментальных данных о затухании акустических волн в кристаллах по механизму Ахиезера [15], определены компоненты тензора вязкости и построены поверхности акустического затухания для кубических кристаллов Ge, CaF₂ и LiF.

Приведены основные формулы для тензора вязкости, описывающего затухание акустических волн, и входящего в уравнение, связывающее напряжение, деформацию и скорость деформации, и для волнового уравнения

$$\sigma_{ik} = c'_{iklm} S_{lm} + \eta_{iklm} \dot{S}_{lm}, \quad (1.25)$$

$$\rho \ddot{u}_i = (c'_{iklm} + i\Omega \eta_{iklm}) \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_m \partial x_k}, \quad (1.26)$$

где \ddot{u}_i - компонента смещения, Ω - частота, а комплексный модуль упругости и эффективные модули упругости выражаются как

$$c_{iklm} = c'_{iklm} + i\Omega\eta_{iklm} = c'_{iklm} + ic''_{iklm} \quad (1.27)$$

$$c_{\varepsilon\phi\phi} = \Gamma_{il}\gamma_i\gamma_l = c_{iklm}\chi_k\chi_m\gamma_i\gamma_l, \quad (1.28)$$

где χ_k, γ_i — направляющие косинусы волнового вектора и вектора смещений.

Вычисления независимых компонент тензора вязкости были проведены для кристаллов $Y_3Al_5O_{12}$, Ge, GaF_2 , LiF. Результаты расчета компонент действительной части тензора упругих коэффициентов и тензора вязкости представлены в виде таблицы 1. Видно, что в исследованных кубических кристаллах упругие постоянные заметно различаются и обусловлено это анизотропией упругих свойств, описываемых тензором упругости четвертого порядка

Таблица 1.1

Компоненты действительной части тензора упругих коэффициентов
(в единицах 10^{10} н/м²) и тензора вязкости (в единицах 10^3 н с/м²)

Кристалл	c_{11}	c_{12}	c_{44}	η_{11}	η_{12}	η_{44}
$Y_3Al_5O_{12}$	33.32	11.07	11.5	0.58	0.38	0.11
Ge	13.0	4.9	6.7	8.82	7.80	0.78
CaF_2	16.4	5.3	3.37	1.53	0.75	0.47
LiF	11.2	4.56	6.32	4.03	-0.62	0.37

Используя компоненты тензоров, приведенные в таблице, в данной работе построены сечения поверхности акустического затухания плоскостями (001) и (110) для рассмотренных кристаллов

В работе [17], с целью определения направления распространения звука в кристалле с минимальным затуханием, проведен поиск таких ориентаций в кубических кристаллах, при которых достигаются наименьшие акустические потери.

Для характеристики анизотропии акустических свойств кристаллов принято использовать так называемый фактор акустической анизотропии, который для кубического кристалла определяется как [17, 18]

$$A = (C_{11} - C_{12}) / 2C_{44} \quad (1.29)$$

где C_{11} , C_{12} и C_{44} — упругие постоянные. Если упругие константы представить в комплексном виде:

$$C_{ijkl} = C'_{ijkl} + iC''_{ijkl},$$

то затухание акустических волн за единицу времени α можно представить, используя мнимые упругие постоянные

$$\alpha = \frac{C''}{2C'} \omega \quad (1.30)$$

где ω — угловая частота упругой волны.

По аналогии с анизотропией действительных частей упругих модулей (1.24) введен фактор анизотропии мнимых модулей

$$A^{Im} = (C''_{11} - C''_{12}) / C''_{44} \quad (1.31)$$

Фактор анизотропии действительных модулей A^{Re} можно выразить через скорости поперечных акустических волн, распространяющихся вдоль направления [110] кубического кристалла:

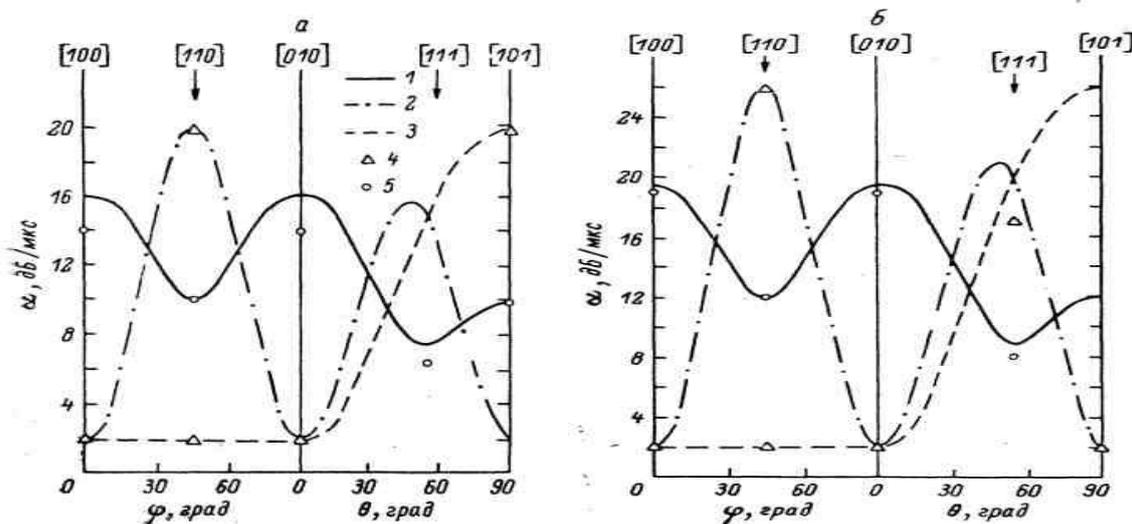
$$A^{Re} = (V_E / V_T)^2 \quad (1.32)$$

где V_E и V_T — скорости волн с поляризациями по [110] и [001]. В таком случае из (1.28 и 1.29) следует:

$$A^{Im} = \alpha_E C_E / \alpha_T C_T \quad (1.33)$$

здесь α_E , α_T , C_E и C_T - затухание и эффективный упругий модуль волн со скоростями V_E и V_T .

По формулам (1.31) – (1.33) были рассчитаны факторы акустической анизотропии и их отношения для 17 кубических кристаллов. Результаты расчетов представлены в таблице и на рис. 1.2. Для расчета использовались имеющиеся в литературе [11-12] данные по затуханию и скоростям упругих волн. Анализ таблицы показывает, что не существует какой-либо корреляции между величинами A^{Re} и A^{Im} . Так, факторы анизотропии действительных модулей A^{Re} для кристаллов кремния, германия, фтористого лития, арсенида галлия, антимонида индия, окиси магния примерно одинаковы ($A^{Re} = 0.5 - 0.7$), а фактор анизотропии мнимых модулей A^{Im} для фтористого лития и окиси магния много больше, чем для остальных кристаллов из этой группы. Все приведенные в таблице кристаллы можно условно разбить на три группы: с фактором $A^{Im} > 1$, $A^{Im} \approx 1$ и $A^{Im} < 1$.



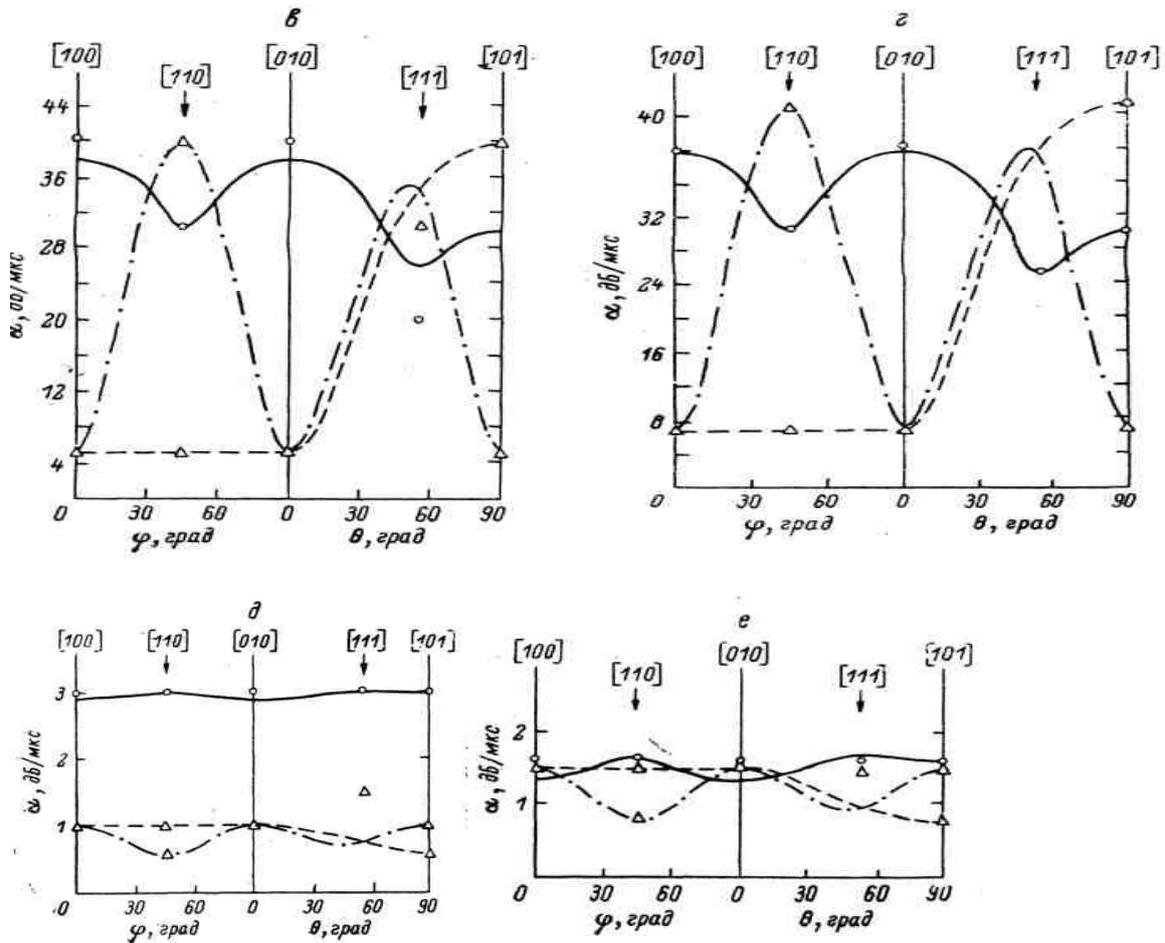


Рис. 1.3. Ориентационная зависимость акустического затухания на частоте 1000 МГц в плоскостях (001) в (101) для кристаллов NaF(а), NaCl(б), KBr(в), KCl(з), BaF₂(д), CaF₂(е). 1 — квазипродольная QL, 2 — квазипоперечная QS, 3 — чистопоперечная S волны.

Из определения мнимых модулей (1.28) и фактора A^{Im} (1.31) можно показать, что условие

$$A^{Im} \gg 1$$

означает, что для затухания продольных волн α^L должны выполняться неравенства

$$\alpha_{[100]}^L > \alpha_{[110]}^L > \alpha_{[111]}^L, \quad (1.34)$$

а для затухания поперечных волн α^S

$$\alpha_E^S > \alpha_{[111]}^S > \alpha_T^S = \alpha_{[100]}^S \quad (1.35)$$

где нижние индексы указывают направления распространения, а для поперечных волн вдоль [110] — обозначения такие же, как и в (1.33).

Противоположное условие $A^{Im} > 1$ приводит к изменению знака в неравенствах (1.31). В случае же $A^{Im} \approx 1$ затухание продольных волн вдоль указанных направлений должны быть практически одинаковыми; также равными оказываются и затухания поперечных волн.

Таблица 1.2

Факторы акустической анизотропии в кристаллах

Кристалл	A^{Re}	A^{Im}	A^{Im}/A^{Re}
Si	0.63	0.63	1.0
Ge	0.59	0.63	1.1
InSb	0.50	0.49	0.98
GaAs	0.56	1.0	1.75
BaF ₂	0.97	0.58	0.60
CaF ₂	1.63	0.87	0.53
SrF ₂	1.07	1.22	1.14
Y ₃ Ga ₅ O ₁₂	0.91	0.48	0.53
Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	1.08	1.08	1.0
MgAl ₂ O ₄	0.41	1.23	3.0
MgO	0.67	7.25	10.8

Таким образом, на основании анализа величины фактора анизотропии мнимых модулей A^{Im} можно заранее указать те направления, которым соответствуют наименьшие акустические потери. Практически же для вычисления величины A^{Im} достаточно экспериментально определить лишь затухания и скорости двух поперечных волн вдоль [110], после чего по неравенствам (1.30) и (1.31) можно заранее предсказать, где будет наименьшее затухание продольных волн вдоль [111] или [100] и каких поперечных – E или T - типов.

Из приведенного обзора видно, что задачи, поставленные в диссертационной работе, к настоящему времени полностью не решены и

являются востребованными в области обработки оптических сигналов для оптимизации работы акустооптических модуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ I

1. Сформулированы основные понятия и рассмотрены уравнения, описывающие распространение акустических волн, включая влияние пьезоэффекта.

2. Представлены основные закономерности акустооптического взаимодействия в кристаллах заключающегося в изменении диэлектрической проницаемости и показателя преломления среды под действием упругих деформаций, индуцируемых акустической волной.

3. Приведен обзор литературных работ, в которых проведены исследования анизотропии упругих свойств кубических кристаллов. Показано, что задачи, разрабатываемые в диссертационной работе с помощью компьютерных методов вычисления, являются актуальными и результаты исследования будут полезными при разработке акустооптических модуляторов оптических сигналов для оптимизации режима их работы.

ГЛАВА 2. АКУСТООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Как известно, акустооптика является разделом физики, изучающей взаимодействие оптических и акустических волн (акустооптическое взаимодействие), а также раздел техники, в рамках которого разрабатываются и исследуются приборы, использующие акустооптическое взаимодействие (акустооптические приборы) [19-24].

Для обозначения широкого круга явлений, связанных с акустооптическим взаимодействием – взаимодействием света со звуком, иногда используют общий термин «акустооптический эффект». Практически в любом акустооптическом устройстве акустическая волна возбуждается с помощью того или иного электроакустического преобразователя.

Таким образом, акустооптические приборы управляются с помощью электрических сигналов (высокой частоты), которые вырабатываются в соответствующих электронных блоках управления. Акустооптику в связи с этим считают ветвью функциональной электроники.

Основные характеристики акустооптических устройств, как дифракционная эффективность и потребляемая мощность, в первую очередь определяются свойствами среды, в которой осуществляется взаимодействие света со звуком. В связи с этим важными критериями при выборе фотоупругой среды является коэффициент акустооптического качества, скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн в материале, который используется в качестве рабочей среды акустооптического прибора.

В данной главе рассмотрены в целом акустооптические явления и их применение в функциональной электронике, а также основные классы акустооптических приборов. Отдельные разделы посвящены принципу действия и конструкции акустооптических модуляторов света.

1. Акустооптические явления и их применение

В узком смысле под акустооптическими явлениями понимают дифракцию и рефракцию света на акустических волнах. Однако, основным явлением, которое используется в современных акустооптических приборах, является акустооптическая дифракция, как в режиме Рамана-Ната, так и в Брэгговском режиме [20-25]..

Акустооптический эффект широко применяется как в научных исследованиях, так и в технических устройствах. В частности, акустооптическим методом можно визуализировать акустические поля и контролировать качество прозрачных материалов. Акустооптические фильтры позволяют осуществлять дистанционный химический анализ различных веществ.

Кроме того, акустооптические устройства оказываются чрезвычайно эффективными для анализа высокочастотных радиосигналов в УКВ и СВЧ диапазонах. Важнейшей областью применений являются системы оптической обработки информации, включая элементы систем оптической связи и оптические процессоры в оптических системах передачи данных.

Разнообразные применения акустооптических приборов становятся возможными благодаря многогранности акустооптического эффекта, с помощью которого можно эффективно манипулировать всеми параметрами оптической волны. К примеру, акустооптические устройства позволяют в динамическом режиме управлять интенсивностью лазерного излучения, положением оптического луча в пространстве, поляризацией и фазой оптической волны, а также спектральным составом и пространственной структурой оптических пучков, генерируемых самыми различными источниками. Все это привело к тому, что в настоящее время разработаны и используются самые разнообразные акустооптические приборы, основные классы которых приведены ниже.

Основные классы акустооптических приборов

Модуляторы - позволяют управлять интенсивностью оптического излучения.

1. Дефлекторы - отклоняют оптический луч на определенный угол, а также осуществляют сканирование луча в пространстве.
2. Перестраиваемые фильтры:
 - фильтры длин волн оптического излучения, или спектральные фильтры, - пропускают оптическое излучение только в определенном интервале длин волн, при этом «окно» пропускания может перестраиваться;
 - фильтры пространственных частот - управляют пространственной структурой оптического пучка (пропускают определенные пространственные частоты углового спектра оптического излучения).
3. Развёртывающие устройства - позволяют считывать оптическое изображение построчно и преобразовывать его с помощью одноэлементного фотоприемника в последовательность электрических сигналов.
4. Анализаторы электрических сигналов (радиосигналов):
 - анализаторы спектра радиосигналов;
 - измерители фазы радиосигналов.
5. Устройства регулируемой задержки - задерживают сигнал на определенное время, длительность которого, в отличие от твердотельных акустоэлектронных линий задержки, легко регулируется (положением оптического луча).
6. Компрессоры радиоимпульсов - осуществляют сжатие электрических импульсов.
7. Акустооптические процессоры - осуществляют те или иные математические операции над оптическими и акустическими сигналами. В частности:
 - Корреляторы - вычисляют корреляцию двух сигналов;

- конвольверы - выполняют математическую операцию свёртки двух сигналов;
- матрично-векторные процессоры - выполняют операции линейной алгебры;

8. Акустооптические системы с обратными связями:

- системы стабилизации оптических и электрических параметров (например, системы стабилизации интенсивности оптического пучка);
- электронно-акустооптические генераторы - автоколебательные системы, содержащие в качестве основного нелинейного элемента акустооптическое устройство; и которые позволяют получать согласованные автоколебания электрических, акустических и оптических величин, включая регулярные и стохастические колебательные режимы;
- бистабильные и мультистабильные системы - акустооптические системы, характеризующиеся двумя или несколькими стабильными состояниями, между которыми возможно переключение при определенном внешнем воздействии; такие системы можно рассматривать как оптические аналоги электронных триггеров.

Современная акустооптика тесно связана не только с акустикой и оптикой, но и с прикладными дисциплинами, такими как оптоэлектроника, акустоэлектроника и радиофизика, а также с кристаллофизикой, поскольку активно исследуется акустооптическое взаимодействие в кристаллах, и влияние их структуры на анизотропию фотоупругих свойств.

Далее будут более подробно рассмотрены устройство, принцип работы и конструктивные особенности акустооптических модуляторов, которые позволяют управлять интенсивностью оптического излучения и широко используются в оптических системах передачи данных.

2. Акустооптические модуляторы света

С помощью акустических волн можно управлять любыми параметрами световой волны: амплитудой, фазой, частотой, состоянием поляризации, направлением распространения. В соответствии с этим возможны различные виды акустооптических модуляторов: амплитудные, фазовые и т. д. [21 - 28]

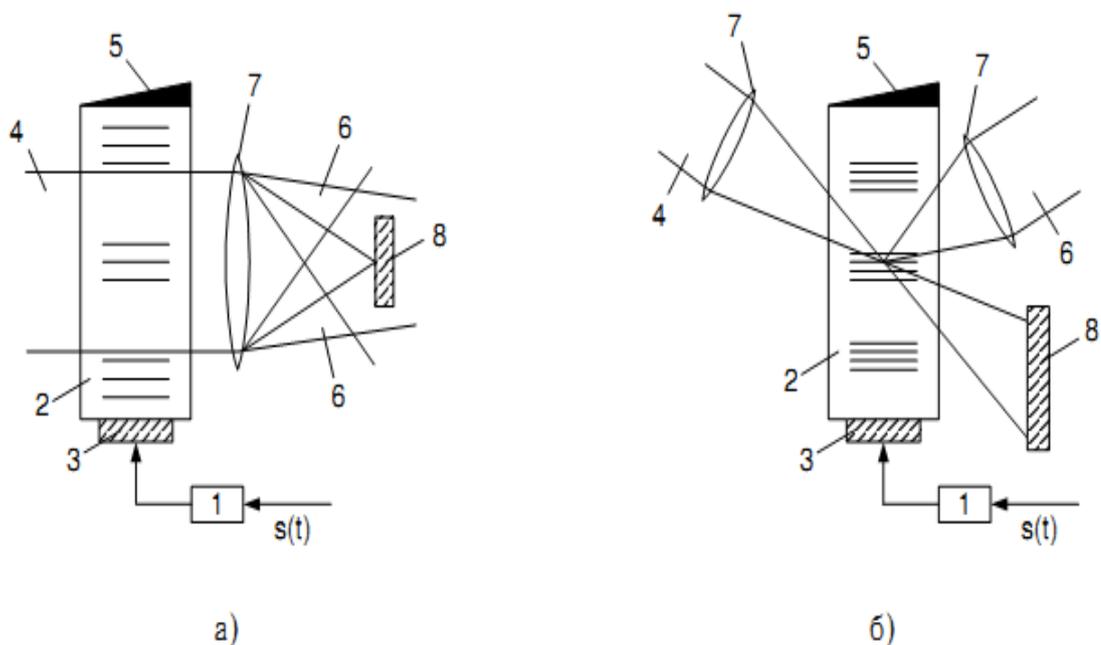
Кроме того, информацию в световой пучок можно вносить, модулируя его как во времени, так и в пространстве. Модуляторы первого типа носят название временных модуляторов, второго – пространственных модуляторов. Следует отметить, однако, что поскольку создаваемое упругой волной пространственное распределение показателя преломления нельзя зафиксировать, то в пространственных акустооптических модуляторах выходной сигнал оказывается промодулированным также и во времени. В этом их отличие, например, от электрооптических пространственных модуляторов, в которых записанная информация может храниться без изменения длительное время [20].

Структура промодулированного излучения определяется как параметрами акустической волны, так и шириной светового пучка d . Если d больше пространственного периода модуляции упругой волны $d > v/f_m$, то имеет место пространственная модуляция света.

При обратном соотношении $d < v/f_m$ отдельные участки светового пучка испытывают приблизительно одинаковое воздействие звукового поля. Поэтому структура дифрагированного пучка близка к структуре падающего, и происходит лишь временная модуляция света.

Из всего возможного многообразия АОМ к настоящему времени детально исследованы и находят применение лишь некоторые виды. В данном разделе рассматриваются временные модуляторы интенсивности света, их различные типы и основные параметры, определяющие применение акустооптических модуляторов.

Рассмотрение АОМ мы начнем с наиболее важного класса таких устройств - широкополосных модуляторов, в которых используется бегущая ультразвуковая волна. Принцип их действия основан на зависимости интенсивности прошедшего через ячейку светового излучения от амплитуды упругой волны [21-23]. В соответствии с этим схема АОМ включает генератор ВЧ электрических колебаний 1 (рис. 2.1) и акустооптическую ячейку 2. Электрические колебания, создаваемые ВЧ генератором, модулируются по амплитуде информационным сигналом $s(t)$, и затем поступают на пьезопреобразователь 3.



- 1 - ВЧ генератор; 2 - модулирующая ячейка;
 3 - пьезодатчик; 4 - падающий световой пучок;
 5 - поглотитель; 6 - дифрагированный пучок; 7 - линзы; 8 - экран

Рис. 2.1. Принципиальные схемы АОМ, работающие в Раман-натовском (а) и в Брэгговском (б) режимах дифракции.

Частота несущих колебаний f_0 выбирается равной центральной частоте преобразователя. В ячейке возбуждается амплитудно-модулированная акустическая волна, на которой дифрагирует световой пучок 4. Режим бегущих акустических волн обеспечивается поглотителем 5.

Дифракционные АОМ традиционно делят на две группы: Раман-натовские (или модуляторы Дебая-Сирса) и Брэгговские [5, 6]. Модуляторы, относящиеся к первой группе, работают на низких частотах ультразвука (~ 10 МГц) и используют раман-натовский режим дифракции. При изменении амплитуды упругой волны модулируется интенсивность всех дифракционных максимумов.

Если рабочими максимумами являются боковые максимумы, то в фокальной плоскости выходной линзы располагается экран, задерживающий непродифрагировавший свет (рис. 2.1 а). Используется и другая схема модулятора, где через отверстия в экране пропускается максимум нулевого порядка, являющийся рабочим, а остальные - задерживаются. Общим недостатком раман-натовских модуляторов является неширокая полоса модуляции Δf . Стремление увеличить Δf автоматически приводит к брэгговскому режиму дифракции света. Отличительная особенность схемы брэгговского модулятора заключается лишь в том, что выбираемый угол падения равен углу Брэгга (рис. 2.1, б). В качестве рабочих максимумов можно использовать максимумы, как первого, так и нулевого порядков. Однако следует учитывать, что в первом случае интенсивность дифрагированного света изменяется синфазно с амплитудой упругой волны, а во втором случае модуляция оптического сигнала имеет противофазный характер.

При малой эффективности дифракции выражения для амплитуды рассеянного света во всех режимах совпадают. Это позволяет провести анализ работы дифракционных модуляторов, не конкретизируя их принадлежности к определенной группе: брэгговских или раман-натовских.

3. Конструкция акустооптического модулятора

Внешний вид акустооптического модулятора (АОМ) видимого диапазона показан на рис. 2.2. [24]. Акустооптической средой этого модулятора является твердотельный образец (например, кристаллический молибдат свинца $PbMO_4$), характеризующийся относительно невысоким затуханием акустической волны. Продольные или поперечные акустические волны возбуждаются пьезопреобразователем из ниобата лития, вырезанного под углом 36° к оси Y .

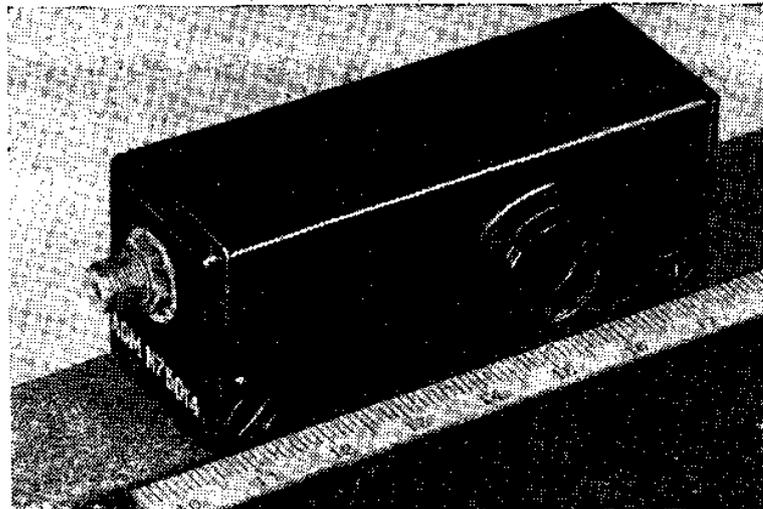


Рис. 2.2. Конструкция акустооптического модулятора

С поверхностью образца - звукопровода пьезопреобразователь обычно соединяется методом диффузионной индиевой сварки. Акустический пучок имеет размеры, примерно, $L=10$ мм, $H=0,7$ мм. К обратной стороне пьезопреобразователя через теплопроводную пасту присоединяется теплоотводящий слой из сапфира. Для поглощения акустической энергии, прошедшей через световой луч, к поверхности звукопровода, противоположной пьезопреобразователю, методом холодной сварки присоединяется пластина из индия.

Центральная рабочая частота модулятора $f_0=80$ МГц. Импеданс преобразователя согласован с 50-омным трактом модулирующего СВЧ сигнала в полосе частот ± 10 МГц с помощью трансформаторной согласующей системы. Величина перетяжки света $w_0=0,1$ мм (коэффициент запаса $s=3,5$). Измерения проводились на длине волны $\lambda_0=0,63$ мкм.

Экспериментальная зависимость относительной интенсивности I_1/I^0 дифрагированного света (эффективности) от СВЧ мощности приведена на рис. 2.3. [22]. Эффективность дифракции достигает 50% на 1 Вт СВЧ мощности.

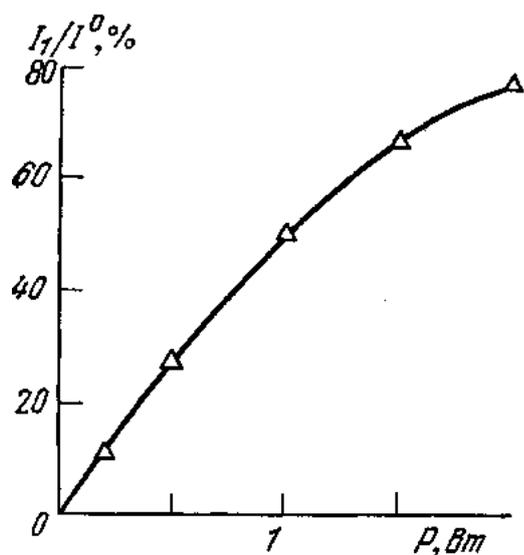


Рис. 2.3. Эффективность АОМ в зависимости от СВЧ мощности

В работе [21] описан акустооптический модулятор из кристаллического кварца, акустические волны в котором возбуждались за счет собственного пьезоэффекта ячейки. Модуляция осуществлялась на фиксированных частотах в диапазоне 10–50 МГц. В модуляторах из ниобата лития [22] для расширения полосы модуляции и увеличения температурной стабильности используются клинообразные ячейки.

4. Параметры акустооптических модуляторов

Акустооптические модуляторы могут использоваться в тех же устройствах или экспериментальных установках, где ранее использовались электрооптические модуляторы (ЭОМ), успешно конкурируя с ними.

Преимуществом АОМ является: более высокая контрастность, определяемая отношением максимальной дифрагированной световой мощности к минимальной; меньшая управляющая мощность и низковольтный вход, что позволяет использовать транзисторный подмодулятор, простая оптическая схема, в которой отсутствуют склейки элементов; температурная стабильность модуляционной характеристики. АОМ может размещаться как вне резонатора лазера, так и внутри его.

Внешние и внутренние акустооптические модуляторы отличаются друг от друга по конструкции и параметрам. Рассмотрим сначала внешние АОМ по сравнению с внешними ЭОМ.

Контрастность. Характерная величина контрастности ЭОМ 10^2 , для АОМ легко получить величину $10^3 - 10^4$. Эта цифра главным образом определяется рассеянием света в материале и может быть еще увеличена.

Управляющая мощность. Известно, что ЭОМ, представляющий собой чистую емкость, не потребляет энергии при модуляции (если отвлечься от диэлектрических потерь). Вся энергия источника модулирующего сигнала рассеивается на его внутреннем сопротивлении. Для того, чтобы обеспечить диапазон частот модуляции от 0 до f_m (по уровню 3 дБ), внутреннее сопротивление источника должно составлять $\sqrt{3}(2\pi C f_m)^{-1}$ Ом, где C – емкость ЭОМ. Мощность, рассеиваемая в источнике, при непрерывной модуляции на частоте f_m определится выражением

$$P_m = U^2 C f_m \left(\frac{\sqrt{3}\pi}{4} \right) \quad (1.1)$$

Для типичного ЭОМ на кристалле DKDP полуволновое напряжение $2U=200$ В., $C=100$ пФ. Следовательно, например, при $f_m=10^7$ Гц в источнике будет рассеиваться, если пренебречь емкостью подводящих проводов, не менее 8 Вт. АОМ, выполненный на молибдате свинца, для модуляции интенсивности света в той же полосе частот потребует менее 1 Вт управляющей мощности, причем для источника сигнала АОМ играет роль согласованной нагрузки.

Конструкция. Простая оптическая схема АОМ и отсутствие склеек не только улучшают качество прибора, но и позволяют модулировать большие непрерывные мощности излучения до 15 Вт. Такие мощности обычно прожигают склейки в кристаллах и поляризационных элементах ЭОМ.

Температурная стабильность. В большинстве ЭОМ используются кристаллы, обладающие естественным двулучепреломлением, величина которого зависит от температуры [27]. Для компенсации температурной нестабильности приходится прибегать к специальным мерам.

В АОМ причин для заметной температурной нестабильности модуляционной характеристики нет. Акустооптические модуляторы характеризуются тем, что для обеспечения высокого оптического качества в них обычно используются кристаллы с хорошими фотоупругими свойствами.

Рассмотрим два типа внутренних АОМ: затворы для твердотельных лазеров, модулирующие добротность резонатора, и модуляторы, обеспечивающие импульсный вывод энергии, запасенной в резонаторе непрерывного лазера.

Применение в затворах. Лазер с модуляцией добротности резонатора работает следующим образом. В процессе накачки лампой активного элемента включается АОМ, который благодаря дифракции света вносит в резонатор потери, обеспечивая такую низкую добротность, при которой не выполняются условия генерации. Когда энергия, запасенная активным элементом, достигает необходимого уровня, АОМ выключается.

В этот момент происходит генерация мощного и короткого импульса излучения. Первоначально модуляция добротности осуществлялась механически, например, с помощью вращающегося отражателя, затем стали использоваться электрооптические затворы, а позднее - АОМ. Преимущества АОМ - низкие потери света и способность одинаково эффективно модулировать любую поляризацию, поскольку в этих затворах используется сдвиговая звуковая волна.

На сдвиговой волне эффективность дифракции в плавленом кварце очень низка ($M_2=0,3$), поэтому такие затворы требуют большие управляющие мощности - до 50 Вт. и водяное охлаждение. Но поскольку АОМ встраивается в лазеры, уже имеющие охлаждение и значительное энергопотребление, это обстоятельство не вызывает серьезных трудностей.

Несущая частота акустооптических затворов обычно 25—50 МГц, быстродействие несколько микросекунд. Используется импульсный вывод излучения из резонатора. Известно, что для ряда непрерывных лазеров интенсивность светового излучения, заключенного между зеркалами резонатора, во много раз превышает интенсивность, излучаемую через эти зеркала. С помощью акустооптического модулятора, помещаемого внутрь резонатора, можно вывести всю запасенную там энергию в виде короткого и мощного импульса.

Для обеспечения необходимого быстродействия свет в резонаторе внутри АОМ фокусируется системой зеркал. Быстродействие АОМ составляет 5 нс, несущая частота 400 МГц. Акустооптический модулятор: в этом устройстве включается на очень короткое время (на время двойного прохода светового луча через резонатор), что составляет около 10 нс. В то же время имеются и потери энергии, связанные с потерями излучения в склейках и поляризационном элементе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ II

1. Рассмотрены основные акустооптические явления и приборы, принцип работы которых основан на акустооптической дифракции, как в режиме Рамана-Ната, так и в Брэгговском режиме, и управляемые с помощью электрических сигналов высокой частоты.

2. Представлены основные классы акустооптических приборов, используемые в функциональной электронике.

3. Рассмотрены принцип действия, конструкции и основные рабочие параметры акустооптических модуляторов света.

4. Приведены основные характеристики акустооптических устройств, такие как дифракционная эффективность и потребляемая мощность, определяемые свойствами среды, в которой осуществляется взаимодействие света со звуком.

5. Показано, что важными критериями при выборе фотоупругой среды является коэффициент акустооптического качества, скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн в материале, который используется в качестве рабочей среды акустооптического прибора.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

Как известно, основным критерием при выборе материала для акустооптического модулятора является коэффициент акустооптического качества M_2 , которое характеризует эффективность взаимодействия. Чем выше качество M_2 , тем меньшая акустическая мощность требуется для получения необходимой эффективности дифракции. Наряду с коэффициентом M_2 , используются и другие характеристики качества, для оценки фотоупругих материалов применительно к конкретным устройствам. Например, эффективность дифракции с учетом обеспечения ее существования в некоторой полосе частот Δf определяется коэффициентом акустооптического качества M_1 .

Ограничение апертуры светового пучка, связанное с затуханием акустической волны, характеризуется еще одной величиной акустооптической добротности $M_a \sim V^4 \cdot \alpha^{-2}$ (V и α – скорость и затухание акустической волны), которая позволяет выбирать направления в кристаллах, характеризующиеся, как малой величиной скорости, так и малой величиной коэффициента затухания акустической волны. При этом необходимо учитывать анизотропию акустических параметров кристаллов, таких как скорость и коэффициент затухания, величина которой с увеличением частоты звука быстро растет (для большинства материалов α пропорционально квадрату частоты акустической волны).

В настоящем разделе представлены результаты численных расчетов характеристик акустических волн в кристаллах, применяемых в акустооптических модуляторах. Поскольку скорость распространения достаточно хорошо изучена, основное внимание уделено исследованию затухания акустических волн в объектах исследования.

1. Акустооптические материалы и их основные свойства

Такие важные характеристики акустооптических устройств, как дифракционная эффективность и потребляемая мощность, в первую очередь определяются свойствами среды, в которой осуществляется взаимодействие света со звуком. Основным критерием при выборе фотоупругой среды является коэффициент акустооптического качества [6, 27-38]

$$M_2 = p^2_{эфф} n^6 / \rho v^3 \quad (3.1)$$

которое характеризует эффективность взаимодействия независимо от геометрии акустооптического взаимодействия. Чем выше качество M_2 , тем меньшая акустическая мощность требуется для получения необходимой эффективности дифракции.

При малой эффективности взаимодействия и малых брэгговских углах отношение интенсивности дифрагированного света к интенсивности падающего света определяется выражением [32]:

$$\frac{I_d}{I_i} = \frac{\pi^2 M_2 P_a}{2\lambda^2 b} \quad (3.2)$$

Это соотношение лежит в основе динамических методов измерения M_2 . Однако прямой расчет по формуле (1.4) требует точного знания акустической мощности, что весьма затруднительно. Поэтому значения M определяются относительно эталонных веществ, параметры которых хорошо известны. В качестве таких веществ обычно применяют плавленый кварц. Эталонный образец из плавленого кварца с преобразователем прикрепляется торцевой гранью к исследуемому образцу. Затем регистрируется интенсивность дифрагированного света в эталонном и исследуемом образце.

Сначала при прохождении акустической волны в прямом направлении ($I_{1з}$, $I_{1х}$), затем после отражения от свободной грани, в обратном направлении ($I_{2х}$, $I_{2з}$). Если измерения для прямого и обратного распространения звука проводятся в одних и тех же точках образцов, то согласно [29-42]:

$$M_{2х} = M_{2з} \left(\frac{I_{1х} I_{2х}}{I_{1з} I_{2з}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

независимо от величины потерь акустической мощности на поглощение и отражение. Хотя этот метод и требует большего времени для определения фотоупругих констант, но зато он позволяет проводить измерения не только на продольных, но и сдвиговых акустических волнах и на более высоких частотах.

Наряду с коэффициентом качества M_2 , используются и другие немного отличные характеристики качества, для оценки фотоупругих материалов применительно к конкретным устройствам. Это связано с тем, что в акустооптических устройствах важно не только получить определенную эффективность дифракции, но также необходимо обеспечить ее существование в некоторой полосе частот. При заданной полосе Δf максимальная ширина акустического пучка b пропорциональна произведению $n \cdot V^2$.

С учетом этого получается, что эффективность дифракции с учетом полосы Δf определяется величиной:

$$M_I = p_{эфф}^2 n^7 / \rho V \quad (3.4)$$

Дополнительное условие может быть наложено и на высоту акустического пучка b . Например, в двумерных дефлекторах значение b ограничивается временем переключения $\tau = b/V$.

Таким образом, дифракционную эффективность можно характеризовать и такой величиной как:

$$M_3 = p_{\text{эфф}}^2 n^7 / \rho V^2 \quad (3.5)$$

Ограничение апертуры светового пучка, связанное с затуханием акустической волны, позволяет ввести еще одну величину акустооптической добротности:

$$M_\alpha = p_{\text{эфф}}^2 n^6 / \rho v^4 \alpha^2, \quad (3.6)$$

где α - коэффициент затухания акустической волны.

Значения M_2 , M_1 и M_3 максимальны у материалов, имеющих высокие показатели преломления, большие фотоупругие константы, малую плотность и скорость звука. К сожалению, не все эти свойства совместимы. Например, большой показатель преломления бывает у веществ с высокой плотностью.

Для целенаправленного поиска новых эффективных фотоупругих материалов, за основу принимаются плотность и химический состав вещества, исходя из которых можно оценить величины n , $p_{\text{эфф}}$, V и, следовательно, определить значение акустооптической добротности. Однако следует отметить, что такой подход носит ограниченный характер, так как не учитывает анизотропию свойств кристаллов. Кроме того, высокое акустооптическое качество материала еще не определяет полностью его пригодность для применения в акустооптических устройствах.

Необходимо учитывать и другие свойства материала, такие как затухание акустической волны, поглощение света в рабочем диапазоне длин волн, возможность получения образцов достаточного размера и высокого оптического качества, механическая прочность, химическая устойчивость, температурная стабильность параметров и т. д.

Среди перечисленных характеристик наиболее важной является величина затухания акустической волны α . С увеличением частоты акустических волн затухание быстро растет, что ограничивает рабочий диапазон Δf (для большинства материалов α пропорционально квадрату частоты акустической волны). Есть целый ряд эффективных материалов, которые по этой причине не считаются перспективными в акустооптике, например, полистирол, органические кристаллы.

В настоящее время известно большое количество материалов с необходимым сочетанием акустооптических свойств. К сожалению, у многих из них высокое значение акустооптической добротности получается в основном за счет малой скорости акустической волны, которой соответствует, как правило, большая величина затухания α .

Созданию новых акустооптических материалов и изучению их свойств посвящено много работ. Наиболее полные сведения об акустооптических кристаллах представлены в справочнике [49]. Там же можно найти и обширную библиографию. Исторически первыми веществами, которые начали применяться в акустооптике, были жидкости, поскольку некоторые жидкости имеют очень высокие значения M_2 . Однако большое затухание звука не позволяет использовать их на частотах выше 50 МГц. В настоящее время вместо жидкостей в акустооптических устройствах используются стеклообразные и кристаллические материалы.

Стеклообразные материалы имеют следующие преимущества: высокая оптическая однородность, возможность получения образцов большого размера и произвольной формы, простота изготовления, низкая стоимость. Однако акустооптическое качество у них в среднем ниже, а затухание звука выше, чем в кристаллах. Среди стеклообразных материалов особенно большие значения коэффициента M_2 имеют халькогенидные стекла: As_2S_3 , As_2Se_3 .

Плавленный кварц SiO_2 хотя и не отличается большой величиной M_2 , но благодаря высокому оптическому качеству и малому затуханию звука он широко используется в акустооптике, особенно для внутррезонаторного управления лазерами и в качестве эталонного образца при измерении акустооптической добротности других материалов.

Важность кристаллических сред для акустооптики определяется не только высокими значениями акустооптического качества, но и тем, что они позволяют создать устройства, для работы которых анизотропия кристаллов принципиально необходима. Среди кристаллов в первую очередь следует отметить TeO_2 , PbMoO_4 , LiNbO_3 , Ge , $\alpha\text{-HfO}_3$. Дадим краткую характеристику указанных кристаллов.

Молибдат свинца PbMoO_4 — один из наиболее распространенных акустооптических кристаллов. Технология выращивания этого кристалла хорошо разработана. Удаётся получать монокристаллы большого размера (до 4 см в диаметре и 12 см длиной) и высокого оптического качества.

Уникальными акустооптическими свойствами обладает парателлурит TeO_2 . Он широко применяется в самых различных акустооптических устройствах - дефлекторах, спектроанализаторах, неколлинеарных фильтрах и др. Парателлурит - это одноосный положительный кристалл ($n_o = 2,26$, $n_e = 2,41$ при $\lambda = 0,63$ мкм), прозрачный во всем видимом и ближнем ИК диапазонах.

Благодаря чрезвычайно низкой скорости поперечных упругих волн в направлении $[110]$ получается очень большое значение качества M_2 , причем достигается оно при анизотропной дифракции. Но эта акустическая мода характеризуется также и высоким коэффициентом затухания.

В кристаллах акустическое затухание ограничивает рабочий диапазон частотами порядка 0.5 ГГц. Для более высоких частот столь же эффективных материалов пока не найдено. И основной ограничивающий фактор - большой коэффициент затухания акустических волн на высоких частотах.

Наилучшим является Ниобат лития LiNbO_3 - отрицательный ($n_o = 2,29$, $n_e = 2,20$ при $\lambda = 0,63$ мкм) сегнетоэлектрический кристалл, который отличается редким сочетанием разнообразных физических свойств: акустических, электрооптических, нелинейно-оптических и др. Ниобат лития - хороший пьезоэлектрик, что определяет его широкое применение в преобразователях для объемных и планарных акустооптических устройств; в последнем случае LiNbO_3 одновременно выступает и как среда, в которой происходит взаимодействие света с ультразвуком. С использованием этого кристалла выполнены многие эксперименты по исследованию анизотропной дифракции и устройств на ее основе.

С увеличением длины волны света потребляемая акустооптическими устройствами мощность быстро возрастает. Поэтому, для работы в ИК диапазоне, требуются среды с очень высокими значениями качества M_2 . Из известных материалов наибольшую величину M_2 в диапазоне 10 мкм имеет теллур. Однако значительное поглощение оптического излучения в этом кристалле и температурная нестабильность препятствуют широкому применению теллура в акустооптике. Поэтому при создании устройств для ИК диапазона, особенно серийных, предпочтение отдается германию - материалу с хорошими оптическими и акустическими характеристиками.

Ниже представлены характеристики одних из наиболее широко применяемых акустооптических материалов – кристаллов парателлуриата и ниобата лития [41-49]. В приведенных таблицах 3.1 – 3.6 направление распространения света дано без учета угла Брэгга. Поляризация световых волн указана относительно плоскости взаимодействия. Величины коэффициента затухания акустических волн для этих кристаллов, которые имеются в литературе, разрознены и часто данные разных авторов не согласуются друг с другом. При этом квадратичная аппроксимация коэффициента затухания не всегда справедлива.

TeO₂, paratellurite

Симметрия: 422; Плотность: 5,984 г/см³;

Диапазон прозрачности: 0,35 -5 мкм

Таблица 3.1

Скорости акустических волн V , 10³ м/с :

Направление Поляризация V , 10³ м/с

[100]	[100], L	3,051
[100]	[010], S	3,317
[100]	[001], S	2,1
[001]	[001], L	4,202
[001]	arb, S	2,104
[110]	[110], L	4,663
[110]	[1-10], S	0,616
[110]	[001], S	2,1

Таблица 3.2

Фотоупругие постоянные p_{ij} :

0,00740,187	0,340	0	0		
0,187	0,00740,340	0	0		
0,09050,09050,240		0	0		
0	0	0	-0,170	0	
0	0	0	0	-0,170	
0	0	0	0	0	-0,0463

Таблица 3.3

Коэффициент акустооптического качества M_2 , $10^{-18} \text{ с}^3 \cdot \text{г}^{-1}$:

Направление звука	Поляризация звука	Поляризация света	Поляризация дифр. света	M_2 ($10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$)
[100]	[100], L	[010]	[100]	0,048
[100]	[100], L	[010]	[001]	10,6
[001]	[001], L	[010]	[100]	34,5
[001]	[001], L	[010]	[001]	25,6
[101]	[-101]	[010]	[100]	77,7
[110]	[1-10], S	[001]	circ.	1200
[100]	[100], L	[010]	[100]	0,048
[100]	[100], L	[010]	[001]	10,6
[001]	[001], L	[010]	[100]	34,5
[001]	[001], L	[010]	[001]	25,6
[101]	[-101]	[010]	[100]	77,7
[110]	[1-10], S	[001]	circ.	1200

LiNbO₃, lithium niobate

Симметрия: 3m; Плотность: $4.65 \cdot 10^3 \text{ кг м}^{-3}$;

Диапазон оптической прозрачности: 0,4 - 5 мкм

Таблица 3.4

Скорости акустических волн V , 103 м/с :

Ось	направление	поляризация	Тип волны	V , (103 м/с)
X	[100]	[100]	L	6,57
X	[100]	[001]	S	4,801
X	[100]	[010]	S	4,0593
Y	[010]	[010]	QL	6,882
Y	[010]	[100]	S	3,962 (3,838)
Y	[010]	[001]	QS	4,494
Z	[001]	[001]	L	7,331 (7,22)
Z	[001]	[010]	S	3,57 (3,588)
Z	[001]	[100]	S	3,57

Таблица 3.5

Фотоупругие постоянные p_{ij} :

0,03	0,079	0,104	-0,071	0	0
0,079	0,03	0,104	0,071	0	0
0,172	0,172	0,078	0	0	0
-0,152	0,152	0	0,22	0	0
0	0	0	0	0,22	-0,152
0	0	0	0	-0,071	-0,025

Таблица 3.6

Коэффициент акустооптического качества M_2 , $10^{-18} \text{ с}^3 \cdot \text{Г}^{-1}$:

Направление звука	Поляризация звука	Направление света	Поляризация Света	M_2 , $10^{-18} \text{ с}^3 \cdot \text{Г}^{-1}$
[001]	[001]	[001]	[010]	6,4
[001]	[001]	[001]	[001]	4,6
[100]	[100]	[100]	[001]	27,4
[100]	[100]	[100]	[010]	5,6
[100]	[100]	[100]	[100]	1,4
[001]	[010]	[010]	[100]	29,2
[001]	[010]	[010]	[010]	29,2
[001]	[001]	[001]	[010]	6,4
[001]	[001]	[001]	[001]	4,6
[100]	[100]	[100]	[001]	27,4
[100]	[100]	[100]	[010]	5,6
[100]	[100]	[100]	[100]	1,4
[001]	[010]	[010]	[100]	29,2
[001]	[010]	[010]	[010]	29,2

2. Описание анизотропии акустических свойств кристаллов с помощью характеристических поверхностей

В данном разделе рассмотрено описание анизотропии скорости и затухания высокочастотных акустических волн с помощью характеристических поверхностей, которые рассчитываются через действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругих постоянных. Рассматриваются обобщенные уравнения Грина – Кристоффеля

и соотношения, необходимые для построения характеристических поверхностей скорости распространения и акустического затухания и результаты такого исследования.

Распространение акустических волн в кристаллах с учетом затухания и анизотропии упругих свойств кристаллов можно описать с помощью характеристических поверхностей. Построение этих поверхностей проводится на основе соответствующих уравнений, для получения которых следует рассмотреть еще раз волновое уравнение, описывающее распространение объемных упругих волн в кристаллах [6, 14].

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_j \partial X_e} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

Теперь только надо учесть, что C_{ijkl} – тензор коэффициентов упругости в общем случае является комплексным [14-17]:

$$C_{ijkl} = C'_{ijkl} + C''_{ijkl} \quad (3.8)$$

Здесь C'_{ijkl} и C''_{ijkl} действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругих констант C_{ijkl} .

Подставляя (3.2) в уравнение движения для элемента объема твердого тела (3.1), получаем соответствующее волновое уравнение, учитывающее диссипацию энергии в акустической волне [6, 7]:

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = (C'_{ijkl} + C''_{ijkl}) \frac{\partial^2 U_{kl}}{\partial X_j \partial X_l} \quad (3.9)$$

Решая уравнение (3.9) в приближении плоской затухающей акустической волны

$$\vec{U}(r,t) = U_m \cdot \gamma \cdot \exp[i \cdot (\vec{q} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t),$$

получаем систему алгебраических уравнений, в которых можно рассмотреть отдельно равенства для действительных и мнимых частей уравнений.

При записи этих равенств делается ряд преобразований. Во-первых, вводятся направляющие косинусы волнового вектора \mathbf{q}

$$\kappa_j = \frac{q_j}{|\vec{q}|}$$

и вектора смещений \vec{U} :

$$\gamma_i = \frac{U_{0i}}{|\vec{U}|}.$$

Во-вторых, вводятся тензоры Кристоффеля, представляющие собой свертку материального тензора упругих модулей, соответственно, действительных или мнимых, по направляющим косинусам единичной волновой нормали \vec{k} :

$$\Gamma'_{ik} = C'_{ijkl} \cdot \kappa_j \cdot \kappa_l \quad (3.10)$$

$$\Gamma''_{ik} = C''_{ijkl} \cdot \kappa_j \cdot \kappa_l \quad (3.11)$$

Используя равенство для действительных частей уравнения, получаем известную систему уравнений Кристоффеля-Грина в виде:

$$\rho(\omega^2 - \alpha^2)\gamma_i = C'_{ijkl} q_j q_e \gamma_k \quad (3.12)$$

или, через тензор Кристоффеля:

$$[\Gamma_{ik} - \delta_{ik} \rho \cdot V^2 (1 - \alpha^2 / \omega^2)] = 0 \quad (3.13)$$

Очевидно, можно пренебречь коэффициентом $(1 - \alpha^2 / \omega^2)$, который пренебрежимо мал из-за относительно малой величины коэффициента затухания акустических волн в кристаллах, и использовать для расчетов скорости и поляризации волн обычные уравнения Кристоффеля:

$$[\Gamma_{ik} - \delta_{ik} \rho \cdot V^2] = 0 \quad (3.14)$$

Отметим, что если известны направляющие косинусы вектора смещений, то есть компоненты вектора поляризации акустической волны, то ее скорость легко определяется с помощью формулы:

$$V = \sqrt{\frac{C'_{\varepsilon\phi\phi}}{\rho}} \quad (3.15)$$

где

$$C'_{\varepsilon\phi\phi} = C'_{ijkl} \cdot \kappa_j \cdot \kappa_l \cdot \gamma_i \cdot \gamma_k$$

Запишем теперь равенство для мнимых частей уравнений (3.11)

$$2\alpha\omega_0 U_{oi} = C''_{ijk} q_j q_k U_{ok} \quad (3.16)$$

как и для действительных частей

$$\kappa_j = \frac{q_j}{q}$$

$$\gamma_k = \frac{U_k}{|U|}$$

Тогда уравнение (3.22) запишется в виде:

$$\gamma_i \left(2 \frac{\alpha \rho V^2}{\omega} j_i \right) = C''_{ijkl} \kappa_j \kappa_e \gamma_k \gamma_l$$

или

$$\frac{2\alpha\rho V^2}{\omega} = \Gamma''_{ik} \gamma_i \gamma_k = C''_{\phi\phi\phi} \quad (3.17)$$

Откуда

$$\alpha = \frac{1}{2} \omega \frac{C''_{\phi\phi\phi}}{\rho V^2} = \frac{1}{2} \omega \frac{C''_{\phi\phi\phi}}{C''_{\phi\phi\phi}} \quad (3.18)$$

Видно, что величина коэффициента затухания α определяется частотой и эффективной упругой постоянной. Этот способ определения коэффициента применим, когда известны компоненты вектора поляризации γ_i . Если же они не известны, то α можно определить так:

Учитываем что $\omega/q=V$ - есть скорость распространения упругой волны и $\Gamma''_{ik} = C''_{ijkl} \kappa_j \kappa_e$ есть тензор Кристоффеля. В результате получим систему однородных уравнений, называемых уравнениями Грина-Кристоффеля относительно неизвестных эффективных мнимых постоянных [17]:

$$\begin{cases} (\Gamma''_{11} - C''_{\phi\phi\phi})\gamma_1 + \Gamma''_{12} + \Gamma''_{13}\gamma_3 = 0 \\ \Gamma''_{12}\gamma_1 + (\Gamma''_{22} - C''_{\phi\phi\phi}) + \Gamma''_{23}\gamma_3 = 0 \\ \Gamma''_{13}\gamma_1 + \Gamma''_{23}\gamma_2 + (\Gamma''_{33} - C''_{\phi\phi\phi})\gamma_3 = 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Как известно такая система имеет нетривиальное решение при условии равенства нулю детерминанта их коэффициентов.

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11}'' - C_{\varepsilon\phi\phi}'' & \Gamma_{12}'' & \Gamma_{13}'' \\ \Gamma_{12}'' & \Gamma_{22}'' - C_{\varepsilon\phi\phi}'' & \Gamma_{23}'' \\ \Gamma_{13}'' & \Gamma_{23}'' & \Gamma_{33}'' - C_{\varepsilon\phi\phi}'' \end{vmatrix} = 0 \quad (3.20)$$

Уравнение (3.26) является уравнением третьей степени относительно компонент единичного вектора поляризации γ . Подставив определенные из (3.26) $C''_{\varepsilon\phi\phi}$ в уравнения (3.25) можно найти γ_i соответствующие каждой акустической волне, т.е. найти возможные направления поляризации акустической волны.

Таким образом, с помощью уравнений (3.21) и (3.24) можно определить скорости и затухания упругих волн в кристалле для любых направлений распространения, т.е. для любых направлений волнового вектора.

Эти направления входят в выражения для компонент тензора Кристоффеля Γ_{ik} общий вид которых определяется симметрией кристалла. Отметим, что для многих классов симметрии выражения для компонент тензора Кристоффеля Γ_{ik} приведены в литературе [3-7].

Такой феноменологический подход к описанию затухания позволяет получить ориентационную зависимость затухания акустических волн, не вдаваясь в механизмы процессов затухания акустических волн. Для этого достаточно знать все действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругости $C_{ijkl} = C'_{ijkl} + C''_{ijkl}$.

3. Общая структура программы расчета

Реализация программного обеспечения для расчетов ориентационных характеристик акустических волн осуществлялась на MATLAB [55-56]. MATLAB - это высокопроизводительный язык для технических расчетов. Он включает в себя вычисления, визуализацию и программирование в удобной среде, где задачи и решения выражаются в форме, близкой к математической. Типичное использование MATLAB - это:

- математические вычисления
- создание алгоритмов
- моделирование
- анализ данных, исследования и визуализация
- научная и инженерная графика
- разработка приложений, включая создание графического интерфейса

MATLAB - это интерактивная система, в которой основным элементом данных является массив. Это позволяет решать различные задачи, связанные с техническими вычислениями, особенно в которых используются матрицы и вектора, в несколько раз быстрее, чем при написании программ с использованием "скалярных" языков программирования, таких как Си или Фортран. Слово MATLAB означает матричная лаборатория (matrix laboratory). MATLAB был специально написан для обеспечения легкого доступа к LINPACK и EISPACK, которые представляют собой современные программные средства для матричных вычислений.



Рис 3.1 Блок-схема алгоритма программы:

Ввод в компьютер акустический сигнала средствами Matlab производится с помощью команды:

```
x=wavrecord(50000,22050,1,'double');
```

где $n=50000$ – количество выборок сигнала, введенных в компьютер с частотой дискретизации $F_s=22050$ Гц. Остальные параметры: 1 – число каналов (т.е. моно); 'double' – 16-битовая запись, данные масштабируются в диапазоне $-1...1$ и представляются в 8-битовом формате с плавающей запятой.

После ввода сигнала в рабочем пространстве (workspace) должна появиться переменная y – массив из 66000 выборок.

Проверка качества введенного сигнала производится с помощью команды:

wavplay(x,22050);

Активация пакета и импорт звукового файла из среды Matlab. Для активизации пакета SPTool нужно в командном окне программы Matlab набрать команду **sptool**.

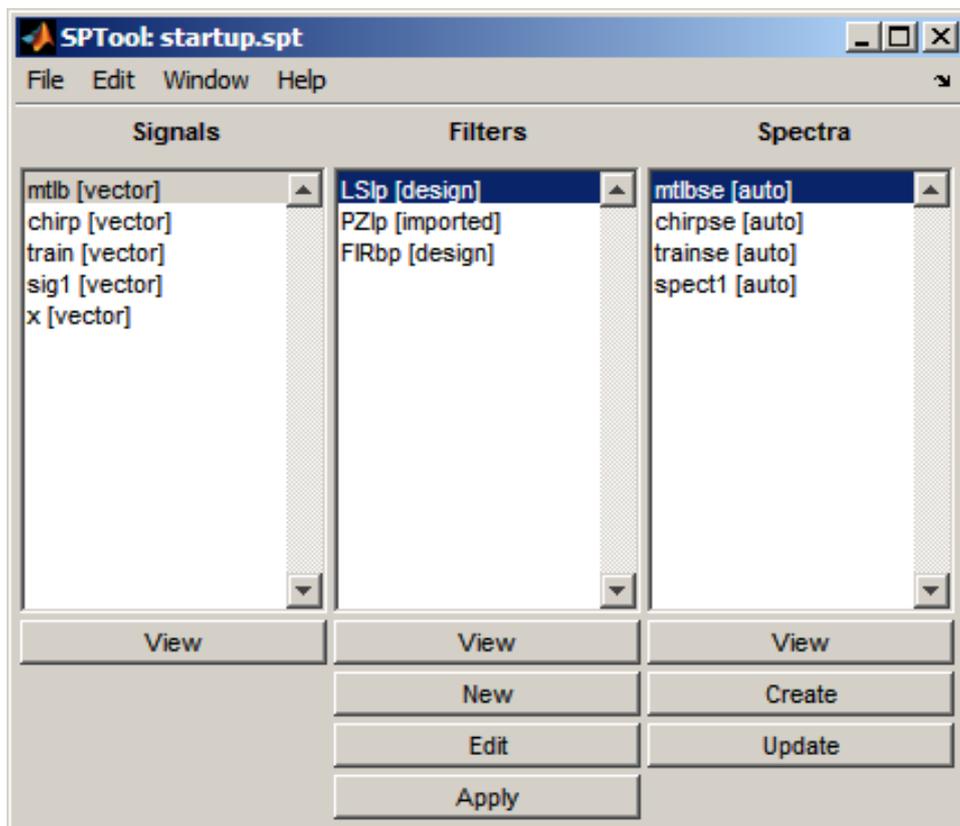


Рис 3.2. Пакет обработки сигналов в MATLAB

Для импорта массива x из среды Matlab:

- в появившемся окне SPTool активизируйте позицию меню «файл – импорт»;
- в появившемся окне Import to SPTool мышкой выделите имя переменной x и перенесите переменную в строку Data, нажав на кнопку со стрелкой вправо;
- укажите частоту дискретизации 22050;
- введите имя сигнала x ;

- нажмите кнопку ОК.

В результате в окне SPTool в разделе Signals появится вектор **x**.

Просмотр, прослушивание и сохранение изображения формы акустического сигнала. Для просмотра формы сигнала нажмите кнопку View в разделе Signals – в результате появится окно Signal Browser с графиком сигнала. Для прослушивания сигнала укажите вертикальными маркерами границы прослушиваемого участка и нажмите пиктограмму с громкоговорителем.

Для сохранения изображения формы речевого сигнала нажмите на клавиатуре Print Screen – в результате изображение экрана сохранится в буферной памяти. Другой способ – в окне Signal Browser задайте режим печати в файл.

Вычисление спектра акустического сигнала. В разделе Spectra окна SPTool нажмите кнопку Create и в появившемся окне Spectrum Viewer задайте параметры спектрального анализа: **Method = FFT; Nfft = 50000**. После нажатия кнопки Apply появится график амплитудного спектра сигнала **x**.

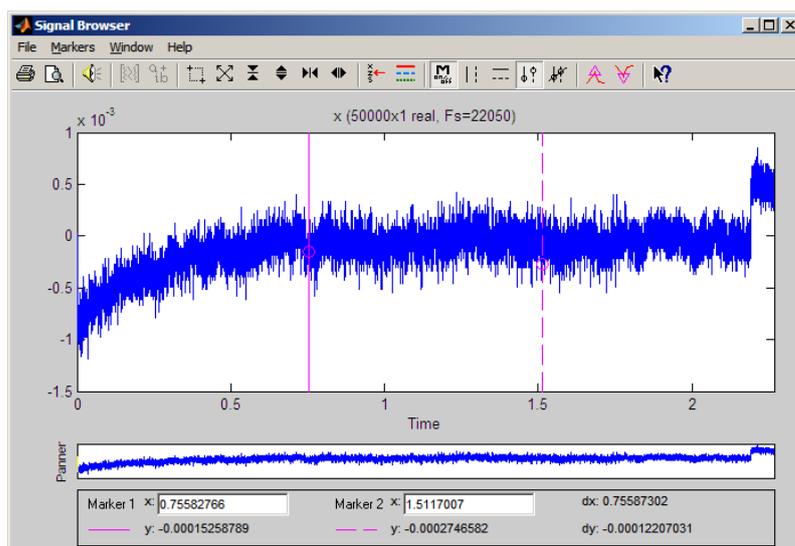


Рис. 3.3. График амплитудного спектра сигнала **x**.

Формирование средствами SPTool фильтра Кайзера. Покажем, как сформировать ФНЧ с частотой среза 500 Гц. Остальные фильтры (ФВЧ и ПФ) формируются аналогично.

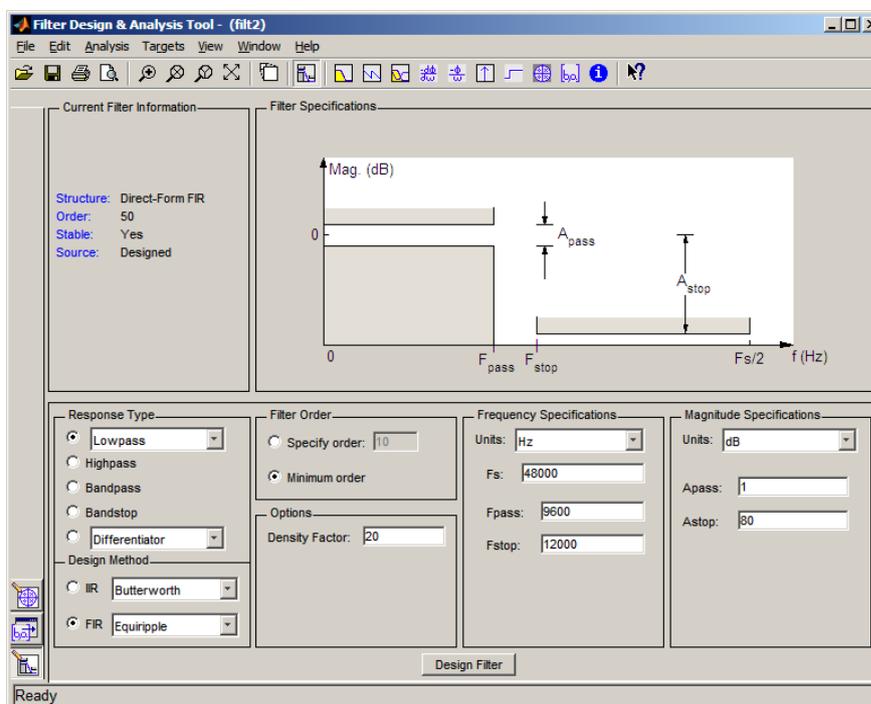


Рис. 3.4. Формирование средствами SPTool фильтра Кайзера.

В окне SPTool в разделе Filters нажмите кнопку New. В появившемся окне Filter Designer:

- задайте частоту дискретизации 22050;
- выберите Algorithm = Kaiser Window FIR;
- отключите флажок Minimum Order;
- задайте Type=lowpass;
- задайте частоту среза $F_c = 500$;
- задайте Beta = 5;
- нажмите кнопку Apply.

В результате будет сформирован нужный фильтр **filt1** – его АЧХ будет показана в окне Filter Designer, а его имя появится в окне SPTool в разделе Filters.

Фильтрация акустического сигнала полученным фильтром. В окне SPTool в разделе Signals должно быть выделено имя фильтруемого сигнала **x**, а в разделе Filters – имя фильтра **filt1**.

Для фильтрации нажмите в разделе Filter кнопку Apply – в результате появится окно Apply Filter, в котором оставьте имя выходного сигнала таким, каким его предлагают, т.е. **sig1**, и нажмите кнопку ОК.

В результате в окне SPTool появится имя вектора **sig1** – это и есть результат фильтрации. Просмотреть, прослушать и сохранить график сигнала **sig1** можно точно так же, как это делалось для исходного сигнала **x**.

Примечание: будьте внимательны - при фильтрации сигнала **x** его имя должно быть выделено в разделе Signals окна SPTool.

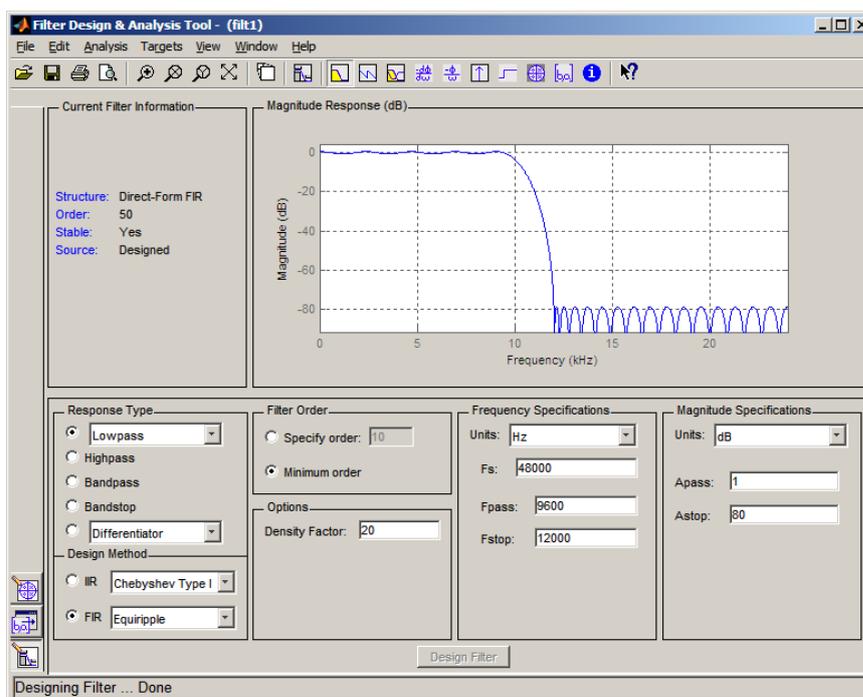


Рис 3.5. Вид окна, отображающего результаты расчетов:

Результаты расчета акустических параметров и их анизотропии Акустические свойства кристаллов, применяемых в акустооптических модуляторах

В настоящем разделе представлены результаты численных исследований характеристик распространения высокочастотных

акустических волн в различных кристаллографических плоскостях пьезоэлектрических кристаллов германата висмута и ниобата лития, применяемых в акустооптических модуляторах. Поскольку скорость распространения достаточно хорошо изучена, основное внимание уделено исследованию затухания акустических волн в объектах исследования. На основе экспериментальных данных, имеющих в литературе [10] и специальной программы расчета определены сечения поверхностей скорости распространения и коэффициента затухания продольных и поперечных волн в гиперзвуковом диапазоне частот.

Кристаллы ниобата (LiNbO_3 - точечная группа симметрии $3m$) обладают редким, сочетанием свойств, благодаря которым они широко используются в акустооптических устройствах. Впервые анизотропный дефлектор на кристаллах ниобата лития был исследован еще в работе [5], однако анизотропия упругих свойств в этих кристаллах изучена недостаточно полно.

Отметим, что действительные компоненты тензора упругих постоянных для этих кристаллов измерялись в ряде работ (например, [7]). Что касается мнимых компонент, описывающих затухание акустических волн, то они практически не исследовались. Наиболее детальные исследования мнимых компонент тензора упругих постоянных были проведены в работе [8], однако: только для ряда кубических кристаллов.

Методика описания анизотропии акустических параметров кристаллов с помощью характеристических поверхностей подробно была рассмотрена в разделе 3.2

Характеристические поверхности исследованных кристаллов

Численные эксперименты проводились с помощью разработанной программы, описанной в разделе 3.3 и уравнений (3.16) и (3.17). Естественно, что для проведения вычислений необходимо знание всех независимых действительных и мнимых компонент C_{ijkl} . Вычислялись скорость и

коэффициент затухания акустических волн в кристалле для любых направлений распространения, т.е. для любых направлений волнового вектора. Расчет акустических волн был проведен для акустических волн, распространяющихся в плоскостях симметрии (001) и (110) в кристаллах германата висмута и ниобата лития.

Величины скорости и коэффициента затухания акустических волн в кристаллах Ниобата лития и германата висмута, необходимые для расчета представлены в таблицах 3.7, 3.8 [42-49]. В таблице 3.7 приведены данные для кристаллов германата висмута. В ней q , и γ – соответственно волновой вектор и поляризация звука.

Таблица 3.7

Скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн в кристаллах германата висмута ($\nu = 1$ ГГц, $T = 293$ К).

Волновой вектор, q	Поляризация звука, γ	Выражение $C_{эфф}$	Скорость $V, 10^3 \text{ м с}^{-1}$	Затухание $\alpha, \text{ дБ мкс}^{-1}$
[100]	[100]	C_{11}	3.77	3.2
	[001]	C_{44}	1.77	1.1
[110]	[110]	$(C_{11}+C_{12}+2C_{44})/2$	3.38	3.8
	[110]	$(C_{11}+C_{12})/2$	2,33	0.85
	[001]	C_{44}	1.74	1.2
[111]	[111]	$(C_{11}+C_{12}+2C_{44})/3$	3.21	4.1
	[110]	C_{44}	2.11	1.0

В таблице 3.8 показаны данные по скорости и затуханию акустических волн в кристаллах ниобата лития [49-54]. Эти данные можно использовать для построения поверхностей фазовых скоростей и акустического затухания.

Таблица 3.8

Скорость и затухание высокочастотных акустических волн в кристаллах
ниобата лития ($\nu = 1$ ГГц, $T = 293$ К)

Направление	Поляризация	Тип волны	$V, 10^5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$	$\alpha, \text{см}^{-1}$ ($\nu=1$ ГГц)
[100]	[100]	L	6.57	0.102
[100]	[001]	FS	4.79	0.092
[100]	[010]	SS	4.08	0.088
[010]	\sim [010]	QL	6.85	0.094
[010]	\sim [001]	QS	4,46	0.085
[010]	[100]	S	3.95	0.127
[001]	[001]	L	7.32	0.037
[001]	[010]	S	3.57	0.186
[011]	\sim [011]	QL	7.06	0.065
[011]	[100]	S	3.73	0.155

Рассчитанная ориентационная зависимость скорости продольных, быстрых поперечных и медленных поперечных акустических волн в кристаллах германата висмута представлена на рис. 3.6, на котором видна динамика изменения величины всех скоростей в плоскости (010) в данных кристаллах и демонстрирует анизотропию скорости распространения продольных и поперечных волн.

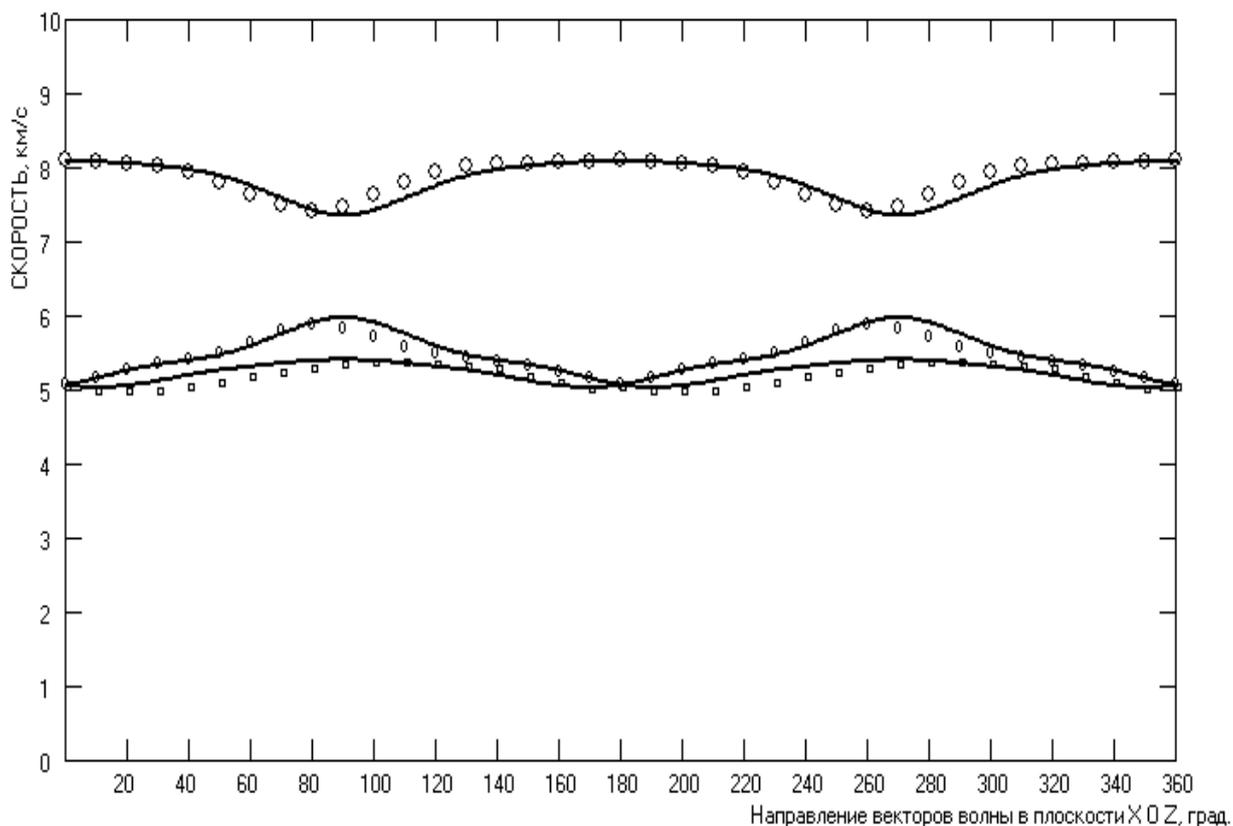


Рис. 3.6. Ориентационная зависимость скорости продольных (наибольшая скорость), быстрых поперечных и медленных поперечных (наименьшая скорость) акустических волн в кристаллах $Bi_{12}GeO_{20}$. В кристаллографической плоскости (010).

Рассчитанная ориентационная зависимость затухания продольных, и поперечных акустических волн в кристаллах германата висмута представлена на рис. 3.7 и 3.8 на которых можно проследить динамику изменения величины коэффициента затухания с направлением распространения акустической волны в данных кристаллах и демонстрирует его анизотропию в кристаллографических плоскостях (001) и (110).

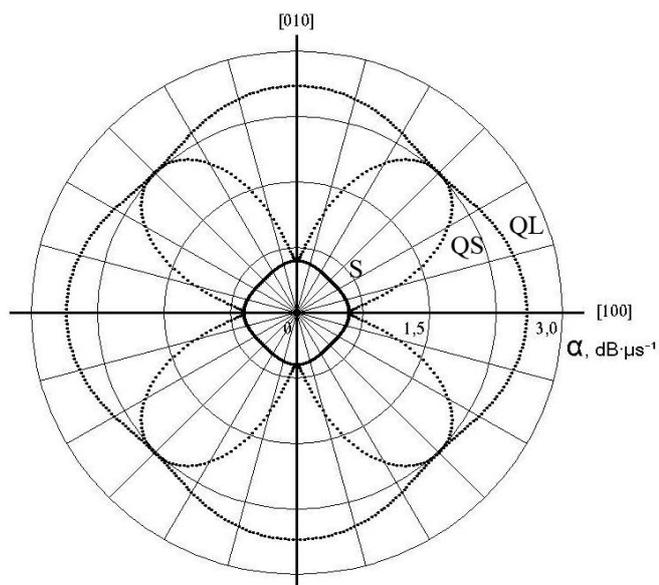


Рис. 3.7. Сечение поверхностей затухания квазипродольных (QL), квазипоперечных (QS) и чистых поперечных акустических волн (S) в кристаллах $Bi_{12}GeO_{20}$ плоскостью (001).

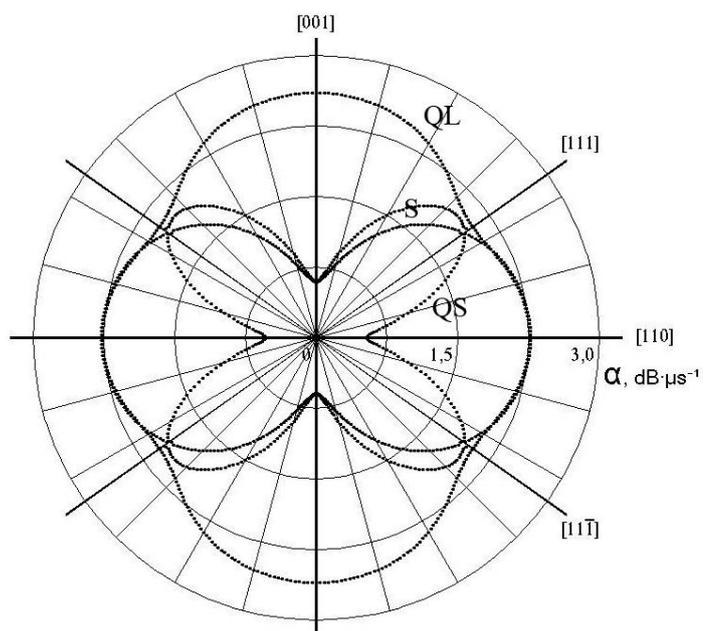


Рис. 3.8. Сечение поверхностей затухания квазипродольных (QL), квазипоперечных (QS) и чистых поперечных акустических волн (S) в кристаллах $Bi_{12}GeO_{20}$ плоскостью (110).

Из рисунков 3.7 и 3.8 видно, что наибольшая анизотропия затухания в кристаллах германата висмута наблюдается для квазипоперечных акустических волн (вектор поляризации расположен в плоскости распространения волны), в то время как затухание чистых поперечных акустических волн (вектор поляризации всегда перпендикулярен направлению распространения) практически не зависит от ориентации кристалла.

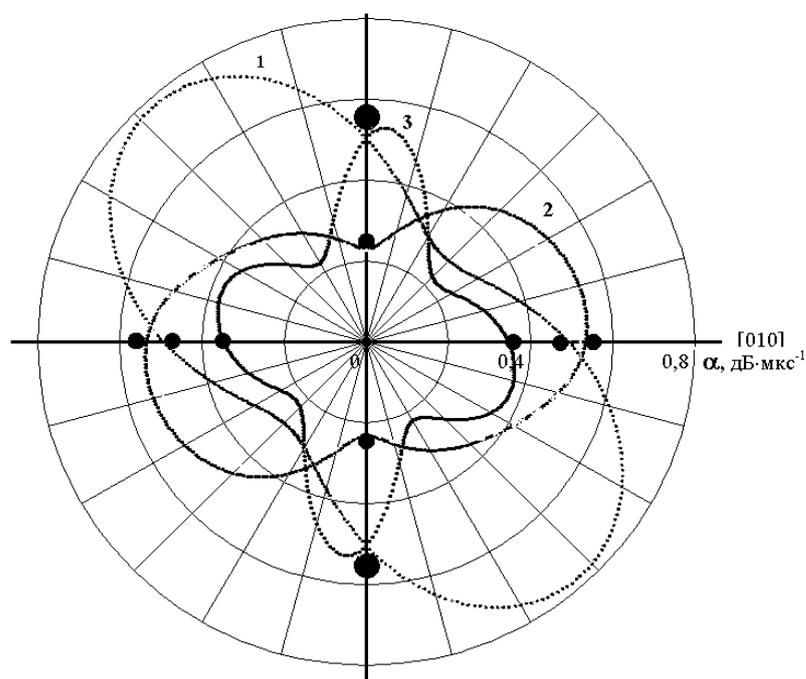


Рис. 3.9. Сечение поверхностей акустического затухания в кристаллах LiNbO_3 плоскостью (010) для продольных (3), не пьезоактивных (1), и пьезоактивных (2) поперечных акустических волн. Затухание выражено в дБ/мкс, частота 1 ГГц.

Из рисунка 3.9. видно, что в кристаллах Ниобата лития в отличие от кристаллов германата висмута наблюдается значительная анизотропия затухания всех типов волн акустических волн

При этом в кристаллах Ниобат лития анизотропия затухания квазипоперечных (вектор поляризации расположен в плоскости распространения) и чистых поперечных (вектор поляризации перпендикулярен направлению распространения) акустических волн заметно больше чем у продольных волн.

Фактор анизотропии для указанных волн характеризуется отношением:

$$\frac{\alpha_{\text{макс}}}{\alpha_{\text{мин}}} \geq 3$$

Отметим, что результаты нашей работы по анизотропии затухания в кристаллах Ниобат лития хорошо согласуются с результатами работы [9].

Таким образом, действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругих модулей могут быть использованы для определения акустических характеристик вдоль любого произвольного направления в кристаллах, и, следовательно, будут полезны при проектировании и конструировании акустоэлектронных и акустооптических устройств, таких как акустические и акустооптические линии задержки, акустооптические фильтры и модуляторы оптических сигналов, с целью получения наиболее оптимальных параметров этих технических устройств.

Из приведенных зависимостей следует также, что наибольшая анизотропия затухания акустических волн в кристаллах ниобата лития (LiNbO_3) имеет место для непьезоактивных чистых поперечных акустических волн, поляризация которых перпендикулярна плоскости сечения. При этом наибольшее и наименьшее значения затухания в кристаллах LiNbO_3 наблюдаются во взаимно перпендикулярных направлениях распространения волн в данной плоскости.

5. Педагогический аспект полученных результатов

Разработанные методы вычисления расчетов параметров акустических сигналов в пакете Matlab можно использовать в обучение практических и лабораторных работах по предметам «Основы передачи данных» и

«Телекоммуникационные системы передачи» по направлению бакалавриата «Телекоммуникация».

При выполнении лабораторной работы по предмету «Телекоммуникационные системы передачи» на тему «Проверка характеристик источников излучения. Изучение линейных кодов оптических сигналов. Изучение и проверка регенераторов оптического сигнала. Основы волоконно-оптических систем» студенты изучают характеристики источников излучения, линейных кодов оптических сигналов, регенераторов оптического сигнала, основы волоконно-оптических систем.

В волоконно-оптических системах связи свет передается по специальному волокну. В их основе лежит свойство светового луча изменять свое направление при переходе из одной среды в другую, называемое *преломлением* или *рефракцией*.

Принцип действия оптического волокна объясняется законом Снеллиуса, который формулируется так: отношение синуса угла падения к синусу угла отражения световой волны равно отношению скоростей распространения волны в двух средах. Это константа, равная отношению показателя преломления второй среды к показателю преломления первой. Приведем формулу, описывающую закон:

$$\frac{\sin A_1}{\sin A_2} = \frac{V_1}{V_2} = K = \frac{n_2}{n_1},$$

где A_1 и A_2 — угол падения и угол отражения соответственно, V_1 и V_2 — скорости распространения света в двух средах, n_1 и n_2 - показатели преломления света в двух средах.

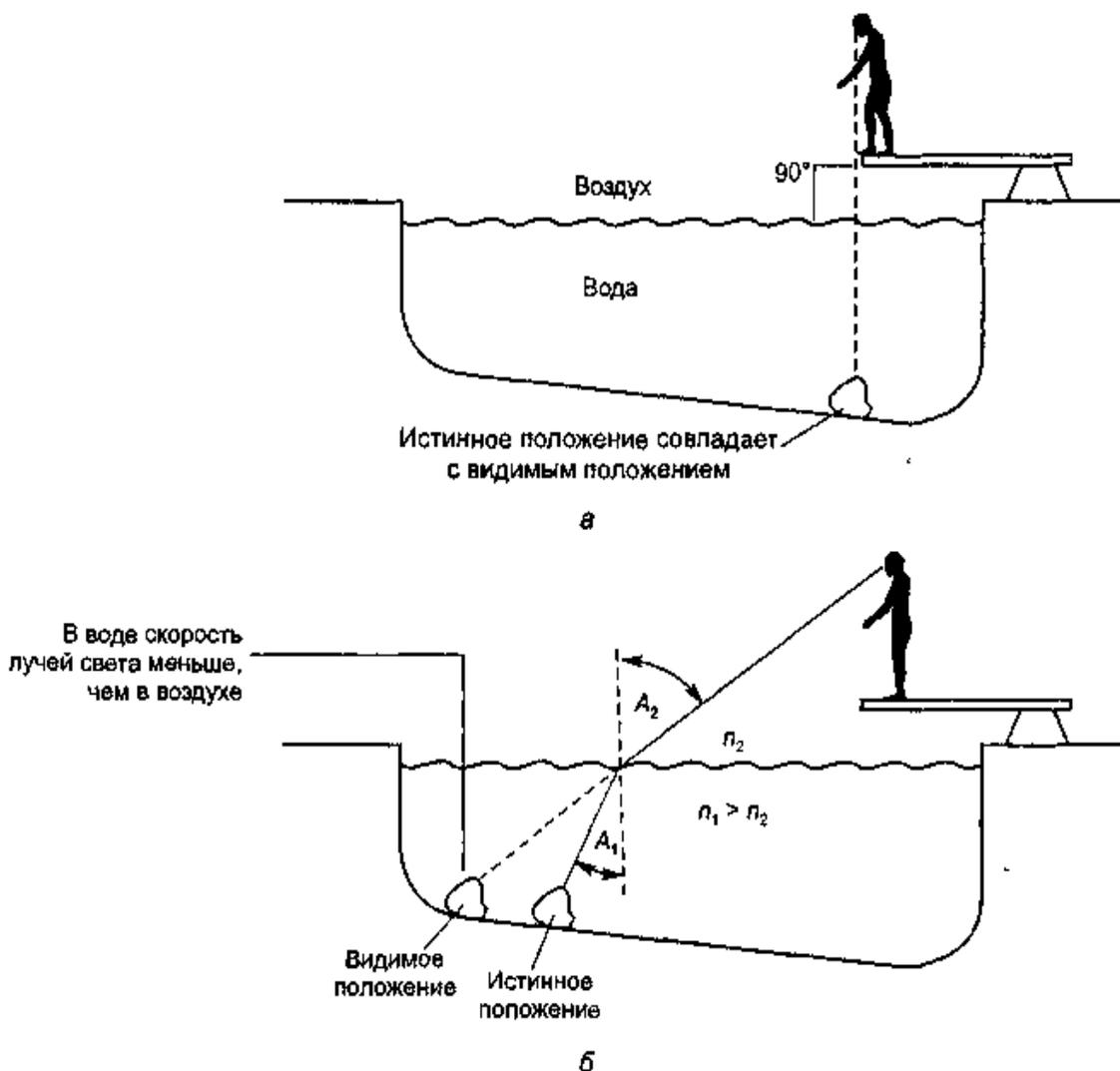


Рис. 3.10. Эффект преломления световых лучей в зависимости от положения наблюдателя; а — угол зрения равен 90° ;

б — угол зрения, отличный от 90°

Рассмотрим рис. 3.11. Здесь A_1 — угол падения луча на поверхность, A_2 — угол его отражения. Показатель преломления среды 1 (n_1) больше показателя преломления среды 2 (n_2). Это означает, что скорость распространения света в среде 2 больше, чем в среде 1. На рис. 3.11, а показано, как при переходе из среды 1 в среду 2 луч света преломляется в среде 2, когда A_x меньше критического угла. На рис. 3.11, б представлена ситуация, когда A_1 равняется критическому углу, а угол A_2 составляет 90° . В этом случае луч света проходит по границе между двумя средами.

Как показано на рис. 3.11, в, любые лучи света с углом падения, большим A_1 будут отражаться обратно в среду 1 под углом A_2 , равным углу A_1 . Именно это свойство представляет интерес для волоконно-оптических технологий.

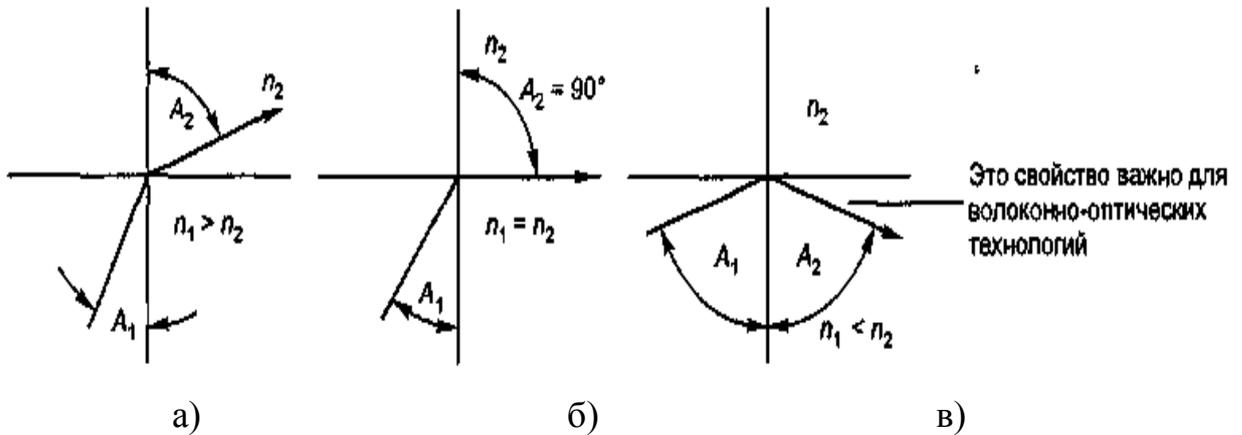


Рис. 3.11. Преломление луча на границе двух сред: а — луч преломляется; б — луч поглощается; в — луч полностью отражается

Структура оптического волокна

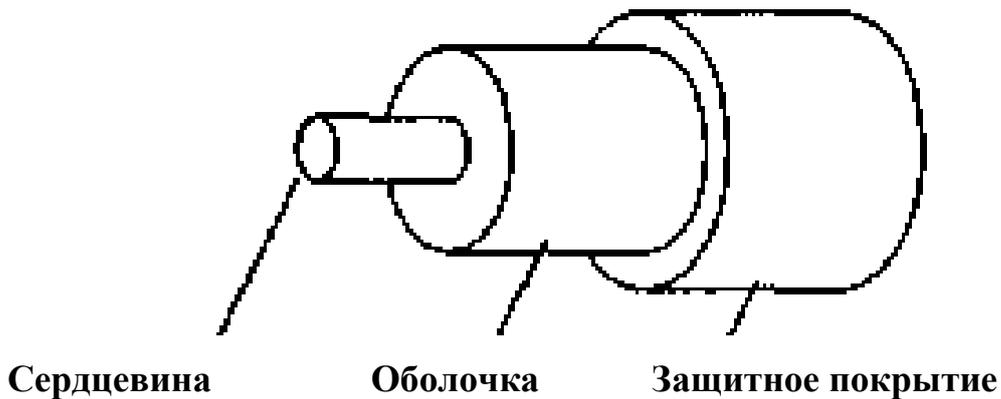


Рис. 3.12. Структура оптического волокна

Оптическое волокно — это диэлектрический (то есть не проводящий электрический ток) волновод, выполненный из стекла или пластика. Оптическое волокно состоит из трех компонентов: сердцевины, оболочки и защитного покрытия (рис. 3.12). Покрытие защищает волокно, но никак не влияет на передачу информации.

Показатель преломления этой конструкции меняется вдоль ее радиуса. Сердцевина волокна имеет постоянный или незначительно изменяющийся показатель преломления, обозначаемый буквами n_1 , а оболочка имеет

другой, постоянный показатель преломления, обозначаемый символом N . Показатель преломления сердцевины выше, чем у оболочки. Поэтому, даже если оптическое волокно изогнуто или завязано в узел, введенный в него световой поток проходит по сердцу вине волокна. У многомодового оптического волокна, которое предназначено для одновременной передачи лучей света, вводимых в него под разными углами, длина сердцевины должен быть в несколько раз больше длины волны света. Длиной волны называется расстояние между двумя ближайшими точками среды, для которых разность начальных фаз волны равна 2π . Длина волны измеряется в нанометрах (нм), или миллиардных долях метра. Толщина оболочки волокна больше радиуса его сердцевины. Несколько типичных характеристик многомодового оптического волокна приведено ниже.

Длина волны света 0,8 мкм.

Показатель преломления сердцевины N_C равен 1,5.

+ Показатель преломления оболочки N равен 1,485 (0,99 x N_C).

+ Диаметр сердцевины равен 50, 62,5 или 100 мкм.

4- Толщина оболочки равна 37,5 мкм.

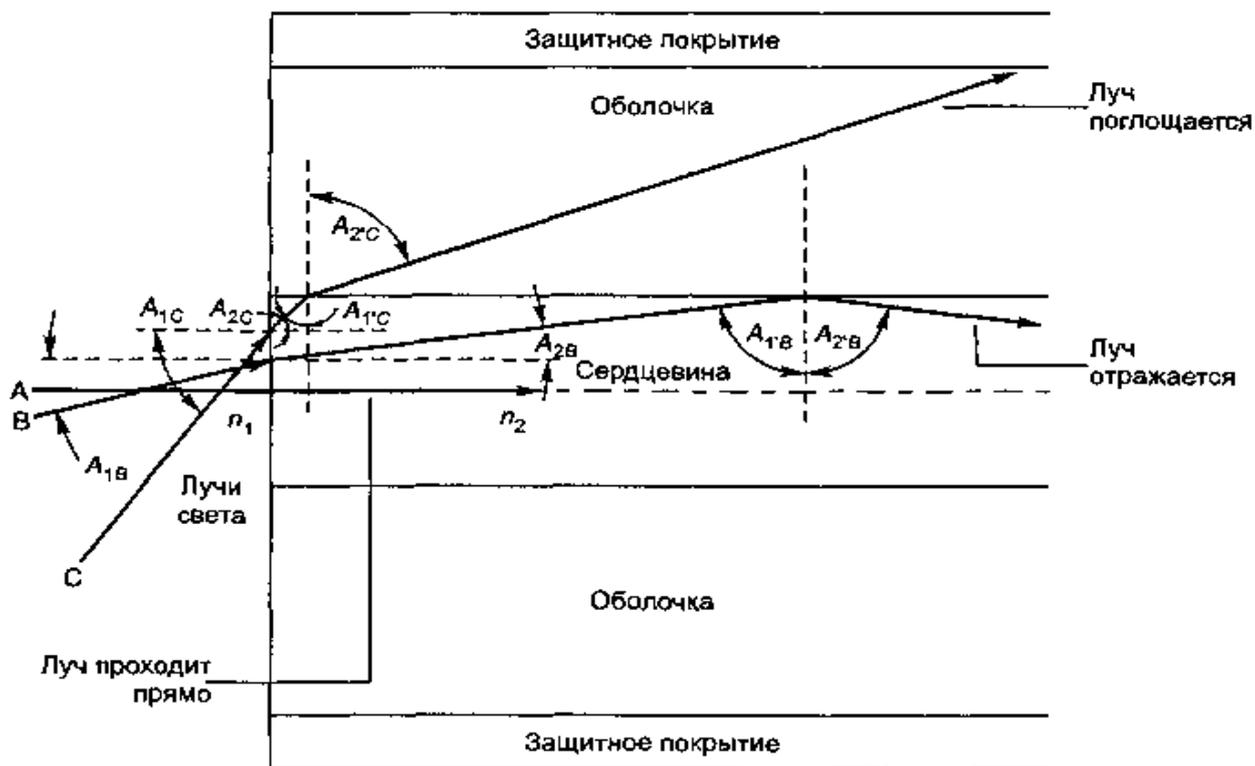


Рис. 3.13. Прохождение лучей света в многомодовом оптическом волокне

Оболочка волокна имеет диаметр 125 мкм, и свет в сердцевине распространяется так, как показано на рис.3.13.

Исходящие от источника света лучи располагаются под разными углами к оси волокна. На рис. 3.13. луч света А входит в волокно перпендикулярно срезу сердцевинки и параллельно оси волокна. Его угол падения равен 0, поэтому луч не преломляется и проходит параллельно оси. Луч света В входит в сердечник волокна из воздуха под углом A_{1B} и преломляется под углом A_{2B} , поскольку n_2 больше n_1 . Когда луч В достигает границы между сердцевинкой и оболочкой, значение угла падения A_{VB} больше критического. Поэтому угол отражения A_{2B} равен A_{VB} и луч преломляется, отражаясь от границы обратно в сердцевину. Этот луч распространяется зигзагообразно по сердцевине до тех пор, пока не достигнет другого конца волокна.

Если угол падения слишком велик, как в случае луча С, луч падает на границу между сердцевинкой и оболочкой под углом A_{1C} значение которого

меньше критического. Такой луч входит в оболочку и распространяется в ней или поглощается защитным покрытием, которое непрозрачно для света.

Модовая дисперсия

Если диаметр сердцевины оптического волокна во много раз превышает длину волны передаваемого света, то пучок лучей проходит по волокну зигзагообразно, отражаясь от границы между сердцевиной и оболочкой. Лучи входят в волокно под разными углами и, пока они достигнут другого конца волокна, отражаются разное количество раз, проходя пути разной длины. Лучи, входящие в волокно под разными углами, называются *модами*, а волокно, поддерживающее несколько мод, — *многомодовым*. Многомодовое распространение лучей вызывает эффект *модовой дисперсии*. Он заключается в том, что лучи, одновременно вошедшие в оптическое волокно под разными углами, выходят из него в разное время.

Большинство оптических систем передает информацию в цифровой форме, то есть в виде последовательностей импульсов света. Однако модовая дисперсия ограничивает возможность волокна передавать различные импульсы, так как вызывает их расширение (рис. 3.13). После того как луч проходит определенное расстояние между излучателем и фотоприемником, разделение импульсов затрудняется или даже становится невозможным. Поэтому начиная с определенного расстояния при передаче данных по многомодовому волокну возникает слишком большое количество ошибок либо передача данных вообще становится невозможной.

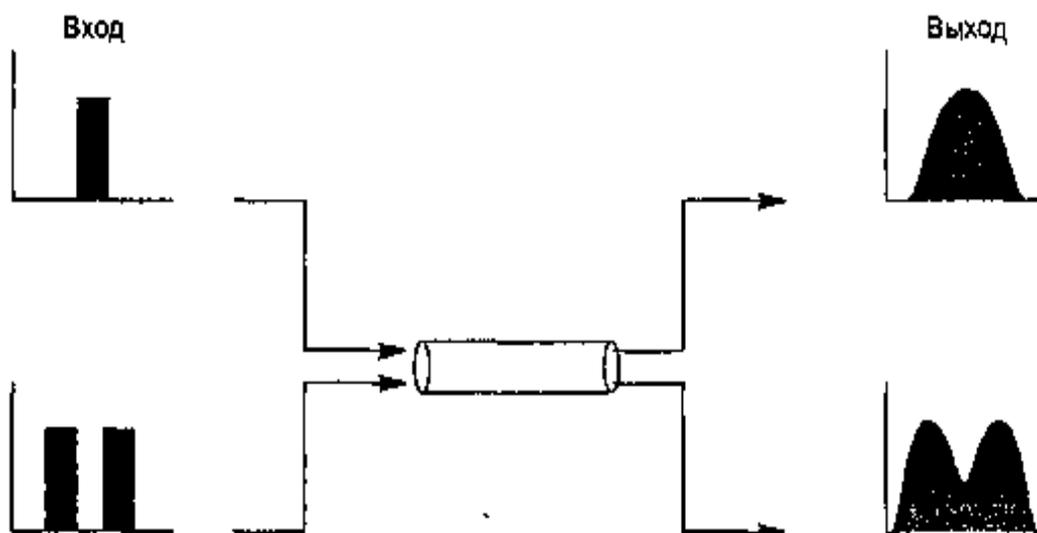


Рис.3.14. Расширение импульсов.

Если диаметр сердцевины волокна незначительно (скажем, в 3 раза) превышает в длину волны передаваемого света, то по волокну может передаваться только один луч, и модовая дисперсия будет отсутствовать. Такие волокна, называемые *одномодовыми*, используются в большинстве систем передачи сигналов. На рис. 3.15, а и 3.15, б показаны варианты распределения показателя преломления по диаметру сердцевины и типичные диаметры сердцевины для многомодовых и одномодовых волокон.

Принципиальное различие между одномодовыми и многомодовыми волокнами состоит в том, что в многомодовом волокне большая часть излучения передается по сердцевине, а в одномодовом — по оболочке вблизи сердцевины. Когда длина волны света достаточно велика для одномодовой передачи, около 20 % мощности излучения приходится на оболочку, а если увеличить длину волны еще вдвое, то на оболочку придется более 50 % мощности излучения.

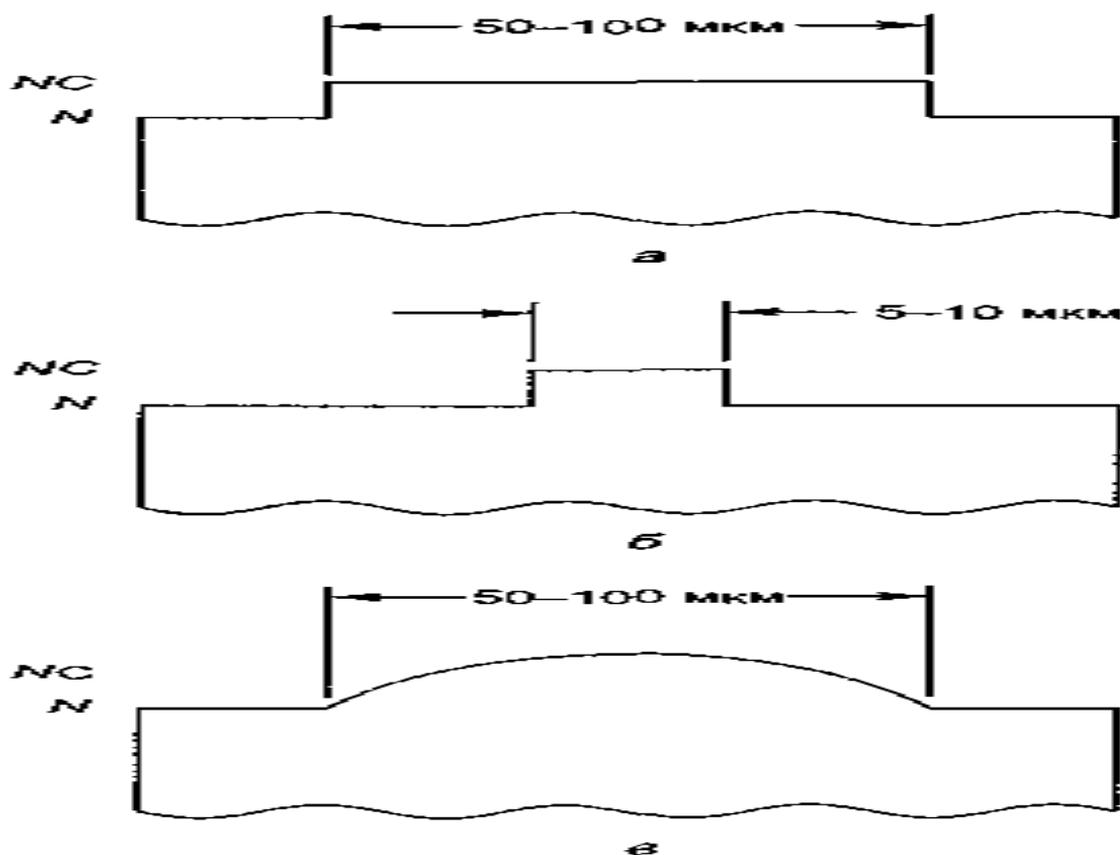


Рис. 3.15. Изменение показателя преломления: а — ступенчатое многомодовое волокно; б — ступенчатое одномодовое волокно; в — градиентное многомодовое волокно.

Показатель преломления

Оптическое волокно различается по характеру распределения показателя преломления вдоль диаметра сердцевин.

+ **Ступенчатое волокно.** Показатель преломления одинаков по всему диаметру сердцевин, а на границе с оболочкой он резко меняется.

+ **Градиентное волокно.** Показатель преломления плавно уменьшается от центра сердцевин к ее периферии.

+ **Одномодовое волокно.** Волокно этого типа, иногда называемое мономодовым, имеет одинаковый показатель преломления по всей сердцевине. Оно позволяет передавать только один луч света.

+ **Градиентное многомодовое волокно.** Показатель преломления плавно уменьшается от центра сердцевин к ее границам, но постоянен в оболочке.

В результате уменьшается модовая дисперсия, поскольку все лучи проходят по волокну почти за одинаковое время.

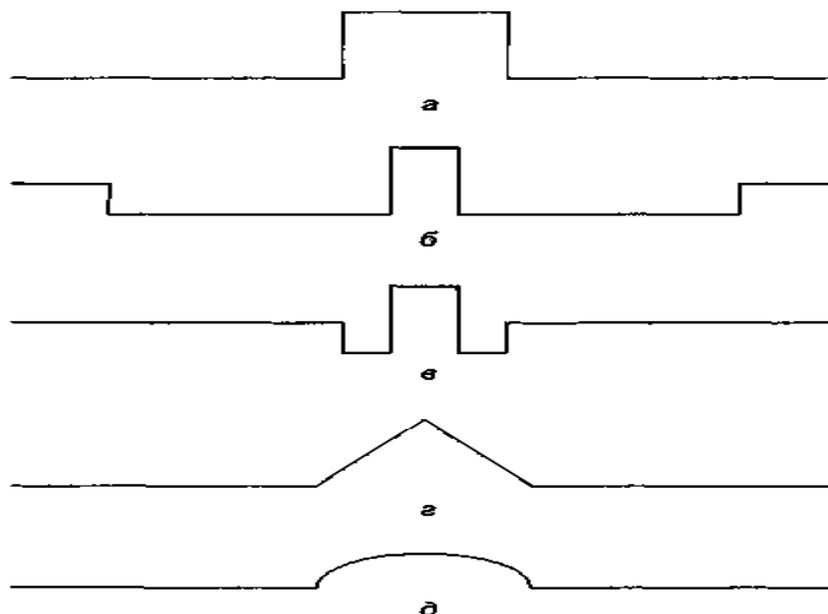


Рис.3.16. Распределение показателя преломления в оптическом волокне: а — ступенчатое; б — оболочка со сниженным показателем преломления; в — W-образное; г — треугольный профиль; д — градиентное

Некоторые из вариантов распределения показателя преломления показаны на рис. 3.15. Существуют и другие варианты распределения, разработанные для решения различных проблем, в частности для уменьшения хроматической дисперсии. Примеры вы найдете на рис. 3.16 (для сравнения здесь показаны и ступенчатые, и градиентные профили показателя преломления).

На рис. 3.17 представлены траектории прохождения потока света через ступенчатое, градиентное и одномодовое волокна. Диаметр сердцевины ступенчатого волокна обычно составляет от 100 до 500 мкм, градиентного — от 50 до 62,5 мкм, одномодового — от 8 до 10 мкм. И ступенчатое, и градиентное волокна обеспечивают многомодовое распространение света.

Полоса пропускания

Ширину полосы пропускания волоконно-оптических систем ограничивают модовая и материальная дисперсии. Описанная выше модовая

дисперсия проявляется в многомодовом волокне. *Материальная дисперсия* обусловлена тем, что лучи света разной длины распространяются в одной и той же среде с разной скоростью.

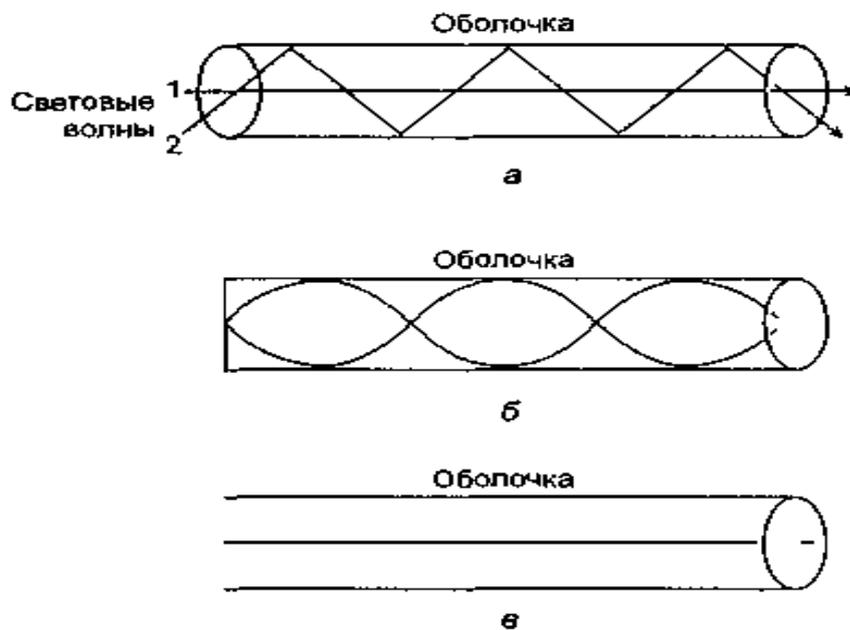


Рис. 3.17. Прохождение потока света через волокна разных типов: а — ступенчатое волокно; б — градиентное волокно; в — одномодовое волокно.

Если источник света, например светодиод, излучает импульсы света не на одной длине волны, волны разной длины проходят по волокну с разной скоростью из-за чего происходит расширение импульсов. Для стандартного светодиода, работающего на длине волны около 0,8 мкм, разница во времени распространения волн, длина которых отличается на 1 нм, составляет примерно 100 пс. Если ширина спектра излучения светодиода составляет 50 нм, световые импульсы расширяются на 5 нс при прохождении ими каждого километра. Это ограничивает полосу пропускания значением 100 МГц/км. К счастью, при определенных длинах волн (приблизительно 1,3 и 1,5 мкм для волокон некоторых типов) в кривой материальной дисперсии имеются нулевые точки, в которых полоса пропускания значительно расширяется. Поэтому проводятся исследования с целью разработки оптического волокна,

источников света и фотоприемников, которые хорошо работали бы в точках минимальной дисперсии, соответствующих длинам волн 1,3 и 1,5 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ III

1. На основе расчетов скоростей акустических волн, распространяющихся в плоскостях симметрии (010) и (110) в кристаллах германата висмута и ниобата лития, показано, что в этих кристаллах необходимо учитывать влияние пьезоэффекта на величину скорости пьезоактивных волн, с поляризацией в плоскости сечения.
2. Определены все действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругих модулей в исследованных кристаллах, необходимые для расчета характеристических поверхностей скорости и затухания.
3. Обнаружено, что в кристаллах германата висмута и силиката висмута благодаря сильному пьезоэлектрическому эффекту наблюдается сильная анизотропия коэффициента затухания пьезоактивных акустических волн, которую необходимо учитывать.
4. Установлено, что наибольшая анизотропия затухания в кристаллах LiNbO_3 имеет место для не пьезоактивных чистых поперечных акустических волн, поляризация которых перпендикулярна плоскости сечения. При этом наибольшее и наименьшее значения затухания наблюдаются во взаимно перпендикулярных направлениях распространения волн в данной плоскости.
5. Выявлено, что фактор анизотропии для указанных волн характеризуется отношением:

$$\frac{\alpha_{\text{макс}}}{\alpha_{\text{мин}}} \geq 3$$

полученный результат по анизотропии затухания в кристаллах ниобата лития хорошо согласуется с результатами работы [9].

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ: Для правильной организации любого производства и соблюдения техники безопасности необходимо, чтобы весь технологический процесс производства был построен в соответствии с ГОСТ 12.3.002-75: «Процессы производственные. Общие требования безопасности». Соблюдение правил безопасности с учетом особенностей применяемой технологии гарантирует безопасность и безвредность трудовой деятельности человека [57-60].

В данном разделе рассмотрены основные и наиболее важные правила электробезопасности и пожарной безопасности, которым необходимо неукоснительно следовать при проведении любых работ. Кроме того, в связи с возрастающим использованием электронно-вычислительной техники в производственных процессах, рассмотрены правила и рекомендации по обеспечению безопасности и безвредности работ с применением компьютеров.

Поскольку тема выпускной работы связана с работой акустоэлектронных и акустооптических устройств и приборов, применяемых в волоконно-оптических телекоммуникационных системах передачи данных, рассматриваются основные правила техники безопасности при работе с различными оптическими источниками излучения.

Приводится, также, классификация источников излучения по степени опасности для зрения и правила применения персоналом защитных очков с соответствующими фильтрами при работе с лазерами класса большой мощности. Отдельно рассматриваются приемы работы с оптическими волокнами и меры предосторожности при использовании химикатов.

Следует помнить, что все правила безопасности эффективны только тогда, когда их неукоснительно соблюдают

Правила электробезопасности

Одним из опасных факторов, которые могут воздействовать на человека, является электрический ток. Электрический ток, проходя через организм человека, оказывает механическое, термическое, электролитическое и биологическое действие. Опасность поражения электрическим током может возникнуть при работах, связанных с использованием промышленных электрических сетей для питания приборов и обслуживании объектов, функционирование которых связано с высоким напряжением.

В целом, в мире от действия электрического тока погибает ежегодно до 25 тыс. человек. Поэтому вопросам электробезопасности следует уделять большое внимание. При питании приборов от электрических сетей причинами электропоражения может явиться случайное прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением, или к конструктивным частям электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением из-за повреждения изоляции.

Защитные меры в электробезопасности можно условно разделить на технические средства безопасности, которые применяются непосредственно в электроприемниках и меры безопасности эксплуатации производственных электрических сетей. К техническим средствам безопасности, применяемым в электроприборах, относятся системы блокировок, обеспечивающие отключение питания, если не закрыта опасная зона, концевые выключатели, экраны, предохранители, предельные автоматы, схемы защитного отключения, двойная изоляция и т. п. Существует много разнообразных технических средств, обеспечивающих безопасность электроприемников.

При эксплуатации электрических производственных сетей из всех средств коллективной защиты наибольшее распространение получили: защитное заземление, защитное зануление и защитное отключение.

Защитное заземление применяется в сетях переменного тока напряжением до 1000В, с изолированным нейтральным проводом. При этом применяется соединение нетоковедущих металлических частей оборудования и электроустановок с землей. Контур заземления подключается к электроприемникам посредством заземляющего толстого проводника. В связи с этим при конструировании оборудования и приборов, которые должны питаться от сетей переменного тока, должны предусматриваться дополнительные болты, клеммы или винты для заземления. Таким образом, основным элементом защитного заземления является заземляющее устройство.

Пожарная безопасность:

ГОСТ 12.1.004-91 требует обеспечения пожарной безопасности системами предотвращения пожара и пожарной безопасности. Согласно ГОСТ пожарная безопасность - состояние объекта, при котором исключается возможность пожара, а в случае его возникновения, предотвращается воздействие на людей опасных факторов пожара и обеспечивается защита материальных ценностей. Причины пожаров могут быть отнесены в основном к двум видам:

- причины электрического характера (короткие замыкания, перегрузки, искрения и электрические дуги, статическое электричество, разряды атмосферного электричества), которые непосредственно связаны с возгоранием электрических цепей или приборов.
- причины неэлектрического характера, в том числе неправильное устройство и эксплуатация отопительных систем, неисправности оборудования, нарушения технологических процессов, неосторожное обращение с огнем, неисправность вентиляционных систем, самовозгорание веществ и т.д.

Для оценки пожаро - и взрывоопасности производств необходимо знать показатели пожаро - и взрывоопасности веществ, используемых в

производственных процессах. Характеристики пожаро - и взрывоопасности некоторых веществ показаны в таблице 4.1.

С точки зрения взрывоопасной и пожарной опасности, в соответствии со СНиП2.05 02-85 «Производственные здания» и НПБ-105-95, все производственные помещения делятся на пять категорий, обозначаемые буквами А, Б, В1-В4, Г, Д.

Таблица 4.1

Вещество	Горючесть, воспламеняемость взрывоопасность	T _{всп} , °C	Пределы воспламенения,%		T _{сам} , °C
			НВП	ВПВ	
Аммиак	ГГ	-	15	28	650
Ацетилен	ВВ	-	2,5	100	335
Ацетон	ЛВПС	18	2,2	13	465
Водород	ГГ	-	4	75	510
Масло трансформаторное	ГПС	147	-	-	270
Этиловый спирт	ЛВПС	13	3,6	19	404

В соответствии с этой классификацией помещения, в которых производится сборка и монтаж устройств, относятся к категории В1. К категории В1 относятся также помещения, в которых находятся горючие жидкие, твердые и трудногорючие вещества и материалы, а также вещества, способные гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом, при условии, что помещения, в которых они находятся не относятся к категории А и Б.

Мероприятия по пожарной профилактике, средства защиты и тушения пожаров

Мероприятия по пожарной профилактике, которые необходимо проводить на предприятиях разделяются на:

- организационные (правильная эксплуатация машин и транспорта, правильное содержание зданий и территории, противопожарный инструктаж работников);
- технические (соблюдение противопожарных норм и правил при проектировании зданий; монтаже электроснабжения, вентиляции, отопления, освещения; правильное размещение оборудования и электросиловых щитов);
- режимные (запрещение курения в неустановленных местах, производства сварочных и других огневых работ в пожароопасных помещениях);
- эксплуатационные (профилактические осмотры, ремонты и испытания технологического оборудования).

Пожарная безопасность должна обеспечиваться системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. Предотвращение пожара должно достигаться предотвращением возможности образования и воспламенения горючей среды. Пожарная защита должна обеспечиваться (ГОСТ 12.1.004-85):

- ограничением количества горючих веществ (в т.ч. регламентацией противопожарных разрывов и защитных зон, периодической очистки помещений от отложений пыли, выносом пожароопасного оборудования на открытые площадки и др.);
- максимально возможным применением трудногорючих и негорючих веществ;
- изоляцией горючей среды (применением герметизированного оборудования, устройством изолированных отсеков, укрытий и др.);

- предотвращением возникновения пожара за пределами очага пожара (устройством противопожарных преград - стен, занавесов; устройством аварийного отключения аппаратов, применением огнепреграждающих устройств - клапанов, заслонок);
- применением средств пожаротушения;
- безопасной эвакуацией людей из очага пожара;
- применением СИЗ и коллективной защиты, если эвакуация людей нецелесообразна);
- системой противодымной защиты;
- применением средств пожарной сигнализации и извещения о пожаре;
- организацией пожарной охраны объекта.

Существуют требования к взрывозащите (ГОСТ 12.1.010-85), которые должны быть обеспечены при наличии опасных факторов. Основные методы тушения пожаров: изоляция очага горения от воздуха, охлаждение и разбавление среды, химическое торможение (ингибирование), механический срыв пламени струей воды и создание условий огнепреграждения.

К основным средствам тушения пожара относятся: вода и водяной пар; инертные газы, углекислый газ, химическая и воздушно-механическая пены, порошковые составы, песок, асбестовые и пр. покрывала и др.

Все виды пожарной техники, предназначенной для защиты объектов, подразделяются на следующие группы (ГОСТ 12.4.009-75):

- пожарные машины (автомобили и мотопомпы);
- установки пожаротушения;
- огнетушители;
- средства пожарной и охрано-пожарной сигнализации;
- пожарные спасательные устройства;
- пожарный инвентарь и пожарный ручной инструмент;

Предприятие должно быть оснащено тем или иным видом пожарной техники в соответствии с нормами.

Для ликвидации небольших загораний на предприятиях используют первичные средства пожаротушения:

- пожарные стволы, действующие от внутреннего противопожарного водопровода, пожарных кранов (ПК).
- ПК, оборудованные пожарными рукавами длиной 10-20 м и пожарными стволами;
- огнетушители;
- асбестовые одеяла;
- пожарный инвентарь.

Правила безопасности и безвредности работ с применением ПЭВМ.

При организации работ на ПЭВМ необходимо учитывать особенность данного процесса. Режимы труда и отдыха при работе с ПЭВМ должны организовываться в зависимости от вида и категории трудовой деятельности.

Виды трудовой деятельности разделяются на три группы:

- группа А – работа по считыванию информации с экрана ПЭВМ с предварительным запросом;
- группа Б – работа по вводу информации;
- группа В – творческая работа в режиме диалога с ЭВМ.

Время регламентированных перерывов в течение рабочей смены следует устанавливать в зависимости от ее продолжительности и категории тяжести (табл. 4.2).

Продолжительность непрерывной работы на ПЭВМ без перерыва не должна превышать 2 часов. При 8- часовой рабочей смене производятся работы группы В. Суммарное время регламентированных перерывов в работе можно принять равным 70 минутам.

Таблица 4.2

Категория работы	Уровень нагрузки за рабочую смену			Суммарное время регламентированных перерывов, мин.	
	Группа А, количество знаков	группа Б, количество о знаков	группа В, часы	при 8-ми часовой смене	при 12-ти часовой смене
І	до 20000	до 15000	до 2	30	70
ІІ	до 40000	до 30000	до 4	50	90
ІІІ	до 60000	до 40000	до 6	70	120

Во время перерывов необходимо для снятия напряжения и усталости применять рекомендованные СанПиН комплексы физических упражнений.

При организации работ необходимо учитывать следующие требования:

1) Площадь на одно рабочее место для взрослых операторов должна составлять не менее 6 кв.м., а объем – не менее 20 куб.м.

2) Схемы размещения рабочих мест должны учитывать расстояния между рабочими столами: в направлении тыла одного монитора и экраном другого должно быть не менее 2 м, между боковыми поверхностями мониторов – не менее 1,2 м.

3) Экран монитора должен находиться от глаз на расстоянии 60 -70 см, но не менее 50 см.

4) При выполнении основной работы во всех помещениях с ПЭВМ уровень шума не должен превышать 50 дБА. В помещениях инженерно-технического персонала уровень шума не должен превышать 60 дБА. На рабочих местах в помещениях с принтерами, АЦПУ и пр. уровень шума не должен превышать 75 дБА.

5) Естественное освещение должно обеспечивать КЕО не ниже 1,2 в зонах со снежным покровом, и не ниже 1,5 на остальной территории.

6) Искусственное освещение должно осуществляться системой общего равномерного освещения. Освещенность на поверхности стола с клавиатурой и рабочими документами должна быть в пределах 300 - 500 лк.

7) Коэффициент пульсации люминесцентных ламп не должен превышать 5 %.

Параметры микроклимата в помещениях с ПЭВМ и ВДТ (видеодисплейными терминалами), а так же эргономические параметры рабочих мест и визуальные эргономические параметры ВДТ, должны соответствовать СанПиН № 2.2.2.542-96.

Источники излучения и меры предосторожности при работе с ними

В результате развития отрасли в течение многих лет мы имеем несколько типов источников излучения различной мощности, работающих на вполне определенных длинах волн, от ультрафиолетового излучения до инфракрасного. В оптоволоконных системах используются три их типа: светодиоды, обычные лазеры и лазеры поверхностного излучения с вертикальным резонатором.

Имеются и несколько вариантов этих трех видов устройств: лазеры с резонатором Фабри - Перо и распределенной обратной связью, а также светодиоды поверхностного и торцевого излучения. Кроме того, для усиления оптических сигналов широко используются усилители, в том числе полупроводниковые.

Основным стандартом, определяющим меры безопасности при работе с оптическими системами, является стандарт ANSI Z136.2. К нему прилагается "Классификация источников лазерного излучения по степени их опасности для зрения". Среди приборов, используемых для обнаружения излучения, наиболее распространенными являются измерители оптической мощности.

Они содержат фотодетекторы, с помощью которых измеряется мощность излучения на различных длинах волн. Кроме того, применяются и другие устройства - фотосенсорные карты, реагирующие на падающее инфракрасное излучение при соответствующей электронной активизации, и приборы инфракрасного видения, преобразующие инфракрасное излучение с длинами волн 800 и 1300 нм в видимый свет. С помощью последних обычно определяют характеристики источников излучения.

Специалисты, имеющие дело с оптической техникой передачи данных, должны помнить, что любое волокно может оказаться активным. Поэтому никогда не следует заглядывать в выходное отверстие передатчика или в торец коннектора.

Для осмотра элементов оптических кабельных систем самым привычным прибором является микроскоп. Он позволяет исследовать поверхность торца волокна, но не способен обнаружить исходящее из него инфракрасное излучение.

Для контроля качества обработки поверхности волокна подходят микроскопы с увеличением в 200—400 раз. Обычно для защиты глаз в них встраивают лазерный фильтр, ослабляющий уровень излучения на 2—35 дБ в зависимости от длины волны. Микроскопы с фильтрами несколько дороже обычных микроскопов, но безопаснее. Перед тем как заказать их, изучите спецификацию каждого из них.

Более дешевые микроскопы, с увеличением в 30-100 раз, которыми комплектуют многие наборы для инсталляции оптических кабельных систем, часто не имеют фильтров. При работе с ними высока вероятность случайного повреждения глаз. Поэтому такие приборы не рекомендуется использовать ни для контроля качества обработки волокон, ни для проверки выполнения требований техники безопасности. Работая с таким микроскопом, необходимо надевать очки, предохраняющие глаза от излучения лазера.

При работе с лазерами класса большой мощности персоналу следует надевать защитные очки с соответствующими фильтрами. Специалисты, имеющие дело с компонентами на основе инфракрасных лазеров, должны носить защитные очки, рассчитанные на длину волны 850 нм.

Кроме того, оснащать их следует фильтрами с оптической плотностью, соответствующей конкретной прикладной задаче. Например, при оптической плотности, равной единице, затухание проходящего оптического излучения составляет 10 дБ. Зная выходную оптическую мощность источника излучения, можно определить необходимое значение оптической плотности, снижающее мощность проходящего излучения до безопасного уровня.

Меры предосторожности при работе с химикатами.

Во многих системах передачи данных, в работе применяются разные химические препараты. В некоторых кабелях используются водоотталкивающие гели; во многих коннекторах волокна закрепляются с помощью эпоксидного клея с ультрафиолетовым, термическим отверждением; в механические соединители для согласования коэффициентов преломления помещают те или иные жидкости и гели. При продаже ко всем этим материалам должна быть приложена «Инструкция по мерам предосторожности при обращении с веществом».

Требования инструкции вытекают из стандарта Hazard Communication Standard, разработанного в 1985 г, который включает полную информацию о производителе препарата; об опасных веществах, содержащихся в нем; о огнеопасности и взрывоопасности. Кроме того должны быть данные о его способности вступать в реакции с другими веществами; о процедурах распаковки и применения, а также обо всех специальных мерах защиты и предосторожностях, которые необходимо соблюдать при использовании этого препарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работ выполненных в данной диссертационной работе можно сформулировать следующие выводы:

1. Рассмотрены и проанализированы теоретические уравнения, описывающие распространение акустических волн, включая влияние пьезоэффекта на скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн.
2. Представлены основные закономерности акустооптического взаимодействия в кристаллах заключающегося в изменении диэлектрической проницаемости и показателя преломления среды под действием упругих деформаций, индуцируемых акустической волной.
3. Проведен обзор литературных работ. Показано, что задачи, разрабатываемые в диссертационной работе с помощью компьютерных методов вычисления, являются актуальными и результаты исследования могут быть использованы для повышения эффективности акустооптических модуляторов.
4. Рассмотрены основные акустооптические явления и приборы, принцип работы которых основан на акустооптической дифракции, как в режиме Рамана-Ната, так и в Брэгговском режиме.
5. Представлены принцип действия, конструкция и основные рабочие параметры акустооптических модуляторов света, включая такие характеристики, как дифракционная эффективность и потребляемая мощность.
6. Показано, что важными критериями при выборе фотоупругой среды является коэффициент акустооптического качества, скорость распространения и коэффициент затухания акустических волн в материале, который используется в качестве рабочей среды акустооптического прибора.

7. Проведен обзор основных свойств акустооптических материалов, применяемых в качестве рабочих сред в акустооптических модуляторах и других акустооптических приборах. Показано преимущество кристаллических материалов по основным параметрам по сравнению со стеклообразными и жидкостными материалами.
8. Установлено, что анизотропия кристаллов заметно влияет на эффективность работы акустооптических модуляторов и показано, что максимальная эффективность зависит от среза кристалла используемого в качестве рабочей среды.
9. На основе литературных данных определены независимые действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругих постоянных в кристаллах ниобата лития и германата висмута, необходимые для расчета характеристических поверхностей скорости и затухания.
10. Выявлено, что наибольшая анизотропия затухания в кристаллах LiNbO_3 имеет место для не пьезоактивных чистых поперечных акустических волн, поляризация которых перпендикулярна плоскости сечения. При этом наибольшее и наименьшее значения затухания наблюдаются во взаимно перпендикулярных направлениях распространения волн в данной плоскости.
11. Установлена возможность увеличения дифракционной эффективности, акустооптических модуляторов, при использовании в качестве рабочих сред кристаллов ниобата лития или германата висмута с определенными акустическими срезами.
12. Показано, что рассчитанные параметры могут быть использованы при конструировании акустооптических модуляторов, применяемых для управления и преобразования оптических сигналов в современных системах передачи данных.

Список используемой литературы

1. Каримов И.А. Концепция дальнейшего углубления демократических реформ и формирования гражданского общества в стране. //Доклад на совместном заседании Законодательной палаты и Сената Олий Мажлиса Республики Узбекистан 12.11.2010г.
2. Каримов И.А.. Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана. Т.: Узбекистан, 2009.
3. Р. Дьелесан Э.Д., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. - М.: Наука, 1982. – 342 с.
4. К.Н. Баранский. Физическая акустика кристаллов. Изд. МГУ, М., 1991.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. - Издание 5-е, - М.: Наука, 2007. - Т. VII. Теория упругости. – 264 с.
6. Балакирев М.К., Гишинский И.А, Волны в пьезоэлектриках. - Новосибирск: Наука СО, 1982. – 240 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Издание 4. М.: Физматлит, 2003. - 656 с.
8. Ахмеджанов Ф.Р., Леманов В.В., Насыров А. Поверхности акустического затухания в кристаллах MgO // Письма в ЖТФ. 1980, Т.6. Вып.10. с.589.
9. Леманов В. В., Ким В. С, Насыров А. Поверхности акустического затухания в кубических кристаллах. — ФТТ, 1984, т. 26, № 4, с. 1013—1015.
10. Bajak I. L., McNab A., Rieher J., Wilkinson C.D. W. J. Acoustic Society of America, 1981, vol. 69, №3, p. 689-695.
11. Н. К. Юшин, А. Н. Насыров, В. С. Ким Анизотропия акустических потерь в кристаллических звукопроводах УЛЗ. Журнал технической физики, т. 56, в. 8, 1986.

12. А. К. Атаходжаев, Ф. Р. Ахмеджанов, М. М. Ахмеджанова, В. В. Леманов. Метод измерения коэффициента затухания упругих волн в материалах, Автор. свидетельство № 1408354, SU, 1988.
13. Большая Российская энциклопедия, - М.: БРЭ, 2004 г. Статья «Акустооптика» (т. 1, 2005 г.).
14. Физическая энциклопедия в 5 тт. под ред. Прохорова А. М., — М.: Сов. энциклопедия / БРЭ, 1988—1998. Статьи: «Акустооптика», «Дифракция света на ультразвуке» (т. 1).
15. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я., Акустооптические устройства и их применения, — М.: Сов. радио, 1978.
16. Кулаков С. В., Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов, — Л.: Наука, 1978.
17. Левин В. М., Маев Р. Г., Проклов В. В., Обработка радиосигналов акустоэлектронными и акустооптическими устройствами, — М.: 1983.
18. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е., Физические основы акустооптики, — М.: Радио и связь, 1985.
19. Бондаренко В. С., Зоренко В. П., Чкалова В. В., Акустооптические модуляторы света, — М.: 1988.
20. Гусев О. Б., Кулаков С. В., Разживин Б. П., Тигин Д. В., Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени, — М.: Радио и связь, 1989.
21. В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985, 280с.
22. О.Б. Гусев, С.В. Кулаков, Б.П. Разживин, Д.В. Тигин. Оптическая обработка сигналов в реальном времени. Москва, 1989, 136с.
23. В.В. Клудзин, О. Б. Гусев. Акустооптические измерения, Ленинград, изд-во ЛГУ, Ленинград, 1987, 152с.

24. М.М Мазур, В.Н. Шорин, А.Ю. Абрамов, З.А. Магомедов, Л.И. Мазур. Спектрометр с двойным акустооптическим монохроматором. Оптика и спектроскопия, 1996, v. 81, N 3, с. 521-523
25. Шилин Б.В., Хотяков В.В. Видеоспектральная аэросъемка – ведущее направление развития дистанционного зондирования в оптическом диапазоне // Оптический журнал .-2004.- т.71.- №3.- 5558.
26. Купченко Л.Ф., Плахов Ю.М., Ефимова О.В. и др. Дифракционная эффективность второго порядка брэгговской дифракции при взаимодействии света с ультразвуком под двойным углом Брэгга // Радио физика и радиоастрономия. Т.4, №4, 1999 г. - С. 342–348.
27. Купченко Л.Ф., Плахов Ю.М., Ефимова О.В. и др. Выбор условий акустооптического взаимодействия для процессоров, использующих составляющие второго порядка брэгговской дифракции // Радиофизика и радиоастрономия - Харьков: 2002 г. Т.7, №2, С. 201–207.
28. Купченко Л.Ф., Коробка А.Г., Черкашина Е.Л., Игнатъев А.В. Акустооптическая фильтрация с использованием дифракции света на ультразвуковой волне под углами, кратными углу Брэгга. Теория и эксперимент// Электромагнитные волны и электронные системы. - Международный научно-технический журнал. М.: Изд.- во. "Радиотехника".-2006. – Т.11, № 2–3, С. 109–126.
29. Андреев И.А. Монокристаллы с умеренной и сильной электромеханической связью для акустоэлектроники и акустооптики.: Автореф. дис. ... док. физ.-мат. наук. - Санкт – Петербург. 2007. – 34 с.
30. Андреев И.А., Ивлева Л.И. Кристаллы для эффективного преобразования и управления лазерным излучением // Оптический журнал. -2007. - Т. 74. - №9. - С.40-44.
31. Ропот П.И., Ковчур С.Н., Кулак Г.В., Николаенко Т. В. Брэгговская дифракция света на гиперзвуке в гиротропных кубических кристаллах.

- // Журнал прикладной спектроскопии. – Минск, 2005. – Т. 72. - № 1. – С. 80- 84.
32. Антонов С.Н. Угловое расщепление Брэгговского дифракционного порядка в акустооптическом модуляторе при частотно-модулированной акустической волне. // Журнал технической физики. - 2005. - Т. 75. - №4. - С. 122-125.
33. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. Обратная акустооптическая задача - когерентное сложение нескольких оптических лучей в один оптический канал. // Журнал технической физики. – Санкт-Петербург, 2007. -Т. 77, - вып. 5 - С. 75-80.
34. Антонов С.Н., Миргородский В.И. Анизотропный акустооптический модулятор неполяризованного света на медленной акустической волне в кристалле парателлурита. // Журнал технической физики. -2004. - Т. 74. - №1. - С. 84-86.
35. Терентьев В. Е. Исследование дифракционных модуляторов на стоячих ультразвуковых волнах в ниобате лития. — Оптика и спектроскопия, 1977, т. 42, № 2, с. 345–350.
36. Антонов С.Н. Акустооптические устройства управления неполяризованным светом и модуляторы поляризации на основе кристалла парателлурита. // Журнал технической физики. -2004. - Т. 74. - №10. - С. 84-89.
37. Андреев И.А. Монокристаллы с умеренной и сильной электромеханической связью для акустоэлектроники и акустооптики.: Автореф. дис. ... док. физ.-мат. наук. - Санкт – Петербург. 2007. – 34 с.
38. Андреев И.А., Ивлева Л.И. Кристаллы для эффективного преобразования и управления лазерным излучением // Оптический журнал. -2007. - Т. 74. - №9. - С.40-44.

39. Дуда А. Особые направления распространения акустических волн в пьезоэлектрических и непьезоэлектрических средах *Акустический журнал*, 2006. – Т. 52. - № 1. – С. 43-50.
40. Задорин А. С. *Динамика акустооптического взаимодействия*, — Томск: Томский гос. университет, 2004.
41. R. W. Dixon and M. G. Cohen. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate. *Appl. Phys. Lett.*, 1966. – No. 8. - P. 205-207.
42. Dixon R.W. Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic light modulators and scanners // *J. Appl. Phys.* - 1967. - V. 38. - P. 5149-5152.
43. *Акустические кристаллы. Справочник.* Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. – 632 с.
44. Ахмеджанов Ф.Р., Ахмеджанова М.М., Алиев Н., Абдиев Р.Т. Анизотропная дифракция света на звуке в кристаллах парателлурита // *Узбекский физический журнал*. – Ташкент, 1997. - Вып. 3. - С. 66-70.
45. Ахмеджанов Ф.Р., Урунов И.О., Икрамов Н.У., Саидвалиев У.А. Исследование упругих свойств кристаллов для акустооптических модуляторов // *Материалы V международной научно-технической конференции*. - Навои, 2010. - С. 387-388.
46. Ахмеджанов Ф.Р., Урунов И.О. Саидвалиев У.А. Анизотропия упругих свойств кристаллов для акустооптических модуляторов света // *Горный вестник Узбекистана*. – Навои.: НГГИ, 2010. - Вып. 4. - С. 209-211.
47. Дьяконов В.П. *MATLAB 6. Учебный курс*. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
48. Мэтьюз Дж.Г., Финк К.Д. *Численные методы. Использование MATLAB*. Пер. с англ. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
49. Дьяконов В., Круглов В. *Математические пакеты расширения MATLAB*.
50. *Специальный справочник*. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

- 51.Безопасность жизнедеятельности: Справочное пособие по дипломному проектированию./ Под ред. Иванова Н. И. и Фадына И. М. –СПб.: БГТУ, 1996.- 122с.
- 52.Безопасность жизнедеятельности: Комплексные средства защиты. Справочное пособие по дипломному проектированию./ Под ред. Иванова Н. И. и Фадына И. М. – СПб.: БГТУ, 2004.-190с.