

На правах рукописи

Бурков Сергей Иванович

**Влияние внешних статических воздействий на распространение
упругих волн в пьезокристаллах и слоистых структурах**

специальность 01.04.03 – радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Физики твердого тела и нанотехнологий»
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

Научный консультант

док. физ-мат. наук, акад.

Александров К.С.

Официальные оппоненты

Ведущая организация

ФГБНУ «Технологический институт
сверхтвердых и новых углеродных
материалов», г. Троицк

Защита состоится «___» _____ 2015 г. на заседании диссертационного совета
Д 003.055.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
«Институт физики им. Л.В. Киренского» СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск,
Академгородок, д. 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики
им. Л.В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Втюрин Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задачи о распространении нормальных акустических волн в анизотропных средах и волн на поверхности изотропных твёрдых тел были аналитически решены в конце XIX века и имели сугубо фундаментальный характер. Изобретение в 30-х гг. XX века пьезоэлектрических резонаторов на основе кристаллического кварца произвело своеобразную революцию в технике стабильной радиосвязи, а также в военнотехнических и медицинских приложениях. Тем самым были стимулированы исследования в области поиска новых материалов и типов волн, которые были необходимы для создания таких устройств, как пьезоэлектрические преобразователи различного назначения, высокостабильные узкополосные фильтры, линии задержки, генераторы, что привело к освоению всё более высокочастотных диапазонов вплоть до СВЧ.

Развитие исследований нелинейных свойств твердых тел начиналось в 50-е годы и в значительной степени было обусловлено появлением устройств пьезотехники и акустоэлектроники. При этом наметились пути использования линейных и нелинейных эффектов в кристаллах для создания новых классов устройств и развития представлений о природе ангармонизма межатомных взаимодействий. В устройстве, функции которого определяются только линейными свойствами материала, влияние нелинейности должно быть минимальным; напротив, существуют и потребности в материалах с максимально высокими значениями нелинейных параметров для создания устройств на нелинейных взаимодействиях акустических волн между собой или с внешними полями (электрическими или механическими). В 80-е годы XX века появился целый ряд работ по исследованию влияния внешнего электрического поля на свойства объемных (ОАВ) и поверхностных (ПАВ) акустических волн в центросимметричных и пьезоэлектрических кристаллах, где, как правило, отмечалась линейная зависимость изменения фазовой скорости акустической волны от величины воздействия при условии отсутствия фазовых переходов или вдали от них.

Исследование взаимодействия упругой волны с интерфейсом двух твердых тел либо со свободной границей кристалла – основная задача в развитии устройств ультразвуковой спектроскопии и неразрушающего контроля (дефектоскопии). Данные исследования актуальны для диагностики твердого тела с микротрещинами, дефектами и деформациями вследствие внешнего воздействия. Также в настоящее время большая часть задач по обработке и формированию сигналов требует использования акустоэлектронных устройств, работающих в диапазоне частот от 1 ГГц до 20 ГГц, которые в основном реализуются на объемных акустических волнах. В частности, разработаны многочастотные составные акустические резонаторы (НВАР), состоящие из слоя

пьезоэлектрика в обкладке из металлических электродов на кристаллической подложке. Составные акустические резонаторы обладают чрезвычайно высокой добротностью, но для оптимизации характеристик устройства необходим режим захвата энергии колебаний, который может нарушаться вследствие трансформации объемной волны в волны типа Лэмба при отражении от поперечных границ резонатора. Кроме того, устройства акустоэлектроники имеют, естественно, конечные размеры, и актуальной проблемой становится учет отражения и преломления упругой волны от границы кристаллической пластины либо учет интерфейса двух пьезоэлектрических сред. Таким образом, задачи отражения и преломления упругих волн в настоящее время остаются актуальными.

Исследование влияния внешнего электрического поля на характеристики фундаментальных (нулевых) мод волны Лэмба в тонких пластинах ниобата лития выполнено в работе [1], где отмечена сильная дисперсионная зависимость скорости волны при воздействии электрического поля. Отмечено, что влияние внешнего электрического поля на скорость акустических волн в пластинах ниобата лития существенно зависит от частоты, и для некоторых направлений распространения волн характер полевой зависимости скорости может быть изменен от линейной до квадратичной посредством изменения частоты акустической волны. Также было продемонстрировано создание перестраиваемого внешним электрическим полем высокодобротного акустического резонатора на пластине ниобата лития. Однако, все исследования влияния внешнего электрического поля на характеристики упругих волн в пьезоэлектрической пластине в основном ограничивались кристаллом ниобата лития и только нулевыми модами упругой волны, хотя потребность расширения возможностей управления параметрами акустоэлектронных устройств несомненна. Не менее актуальна в настоящее время проблема использования мод упругой волны более высокого порядка, которые зачастую обладают более высокими значениями коэффициентов электромеханической связи и более эффективным акустоэлектронным взаимодействием с внешним электрическим полем.

В настоящее время в разработке акустоэлектронных устройств также активно используются структуры типа «слой/подложка», что связано, в первую очередь, с более простыми технологическими процессами и механической прочностью таких устройств. Например, разработаны образцы СВЧ акустоэлектронных устройств на основе алмазоподобных пленок, имеющих высокие скорости акустических волн, с нанесенными на них пьезоэлектрическими пленками (AlN или ZnO), в том числе и с учетом неидеального контакта «слой/подложка». Устройства на упругой волне в слоистой структуре (волны Лява, рэлеевские моды) хорошо подходят для использования в датчиках

для исследования свойств жидкостей в связи с очень высокой чувствительностью вследствие концентрации акустической энергии в основном в пределах слоя. Подобная конструкция представляет собой уникальное сочетание высокой чувствительности к давлению (гравиметрические датчики) и вязкости и преимущества тонкопленочной технологии.

Исследование влияния внешних статических полей, особенно внешнего одноосного механического напряжения, на характеристики упругих волн, распространяющихся в слоистых структурах, в последнее время привлекает внимание разработчиков в связи с расширением области применения акустоэлектронных устройств, в частности, датчиков, фильтров и преобразователей частоты в промышленности и медицине. Например, пьезоэлектрические датчики широко используют для измерения давлений. Механическое напряжение значительно меняет характеристики пьезоэлектрического устройства вследствие изменения как свойств самого материала, так и геометрических размеров образца. Результаты изменений физических свойств кристалла под влиянием механического однородного давления [2] использовались, чтобы стабилизировать частоту резонатора, особенно для температурной компенсации ухода частоты резонаторов на основе кристаллов лангасита и кварца.

Таким образом, изучение влияния внешних воздействий на распространение упругих волн в слоистых структурах востребовано и, несомненно, актуально. Однако, в основном были рассмотрены изотропные среды или поперечно-изотропные срезы кристаллов, в которых влияние внешнего воздействия на характеристики упругой волны в слоистой структуре рассматривалось в рамках теории возмущений, либо для учета пьезоэффекта использовался метод эквивалентных схем. Следовательно, строгое термодинамическое описание распространения упругой волны в слоистой пьезоструктуре, подвергнутой воздействию внешнего электрического поля или механического напряжения, востребовано и актуально.

Затронутый круг проблем – исследования условий распространения упругих волн в пьезокристаллах и структурах в условиях внешних статических воздействий (электрического поля, механического одноосного давления), прежде всего, необходим для создания управляемых устройств акустоэлектроники либо коррекции их рабочих характеристик. Однако к моменту начала работы отсутствовало строгое термодинамическое описание процессов отражения и преломления ОАВ от границы раздела двух сред, и процессов распространения упругой волны в слоистой пьезоструктуре, подвергнутых внешнему воздействию. Таким образом, описание взаимосвязанных вышеназванных проблем представляет как теоретический интерес для

понимания процессов, происходящих в конечно-деформированной пьезоэлектрической среде при распространении упругой волны, так и практический – для создания и оптимизации характеристик управляемых акустоэлектронных устройств.

К началу настоящей работы многие перспективные исследования в данных областях обычно ограничивались аналитическими решениями задач в относительно простых геометриях упруго-изотропных или высокосимметричных сред. Действительно, даже расчёт скоростей распространения поверхностных волн Рэлея мог быть аналитически получен лишь для поверхности упруго-изотропного твёрдого тела. Начиная с 70-х гг. XX века благодаря развитию средств вычислительной техники и необходимых математических приложений появились возможности резкого расширения круга задач кристаллоакустики, которые могли быть решены только численными методами. Автор данной работы оказался непосредственно причастен к разработке новых компьютерных программ и реализации численных методов для целей акустоэлектроники и кристаллоакустики, благодаря чему были получены оригинальные результаты по исследованию анизотропии распространения ОАВ и ПАВ в ряде пьезоэлектриков в условиях конечных внешних воздействий; решены задачи отражения, преломления и трансформации акустических волн на границе раздела упругих твёрдых тел с произвольной симметрией; исследованы особенности распространения нормальных мод Лэмба и SH -волн в пьезоэлектрических пластинках; построена компьютерная модель для анализа основных параметров составного акустического резонатора на основе слоистой пьезоэлектрической структуры « $Me_1/AlN/Me_2/(100)$ алмаз»; и т.п.

Таким образом, основной задачей данной работы было развитие теории распространения нормальных акустических волн в конечно-деформированной пьезоэлектрической среде с учетом наличия границ раздела, изучение особенностей распространения акустических волн в таких условиях, а также эффектов управления, взаимодействия, трансформации и т.п. мод упругих волн.

Целью диссертационной работы является комплексное исследование характеристик акустических волн в пьезокристаллах, в пьезоэлектрических пластинах, слоистых пьезоструктурах, подвергнутых внешнему воздействию статического электрического поля или одноосного механического напряжения.

В задачи исследований входит следующее:

1. Проанализировать влияние внешних статических воздействий (электрического поля и одноосного механического напряжения) на условия распространения объемных (ОАВ) и поверхностных (ПАВ) акустических волн в пьезокристаллах кубической и тригональной сингонии.

2. Рассмотреть особенности распространения ОАВ и ПАВ, возникающие вследствие изменения упругой симметрии при внешних статических воздействиях в окрестности акустической оси, а также характер трансформации акустических осей.

3. Теоретически исследовать влияние внешних статических воздействий (электрического поля и одноосного механического напряжения) на закономерности отражения и преломления ОАВ от границы раздела «кристалл-вакуум» и от границы раздела двух кристаллов.

4. Выполнить исследование особенностей распространения упругой волны в пьезокристаллической пластине, подвергнутой воздействию внешнего электрического поля. Сделать оценки возможного применения исследованных кристаллов в управляемых устройствах акустоэлектроники.

5. Выполнить теоретический анализ температурных зависимостей упругих волн в пластинах кристалла лангасита и оценить возможность термокомпенсации внешним электрическим полем.

6. Выполнить исследование влияния внешних статических воздействий (электрического поля и одноосного механического напряжения) на характеристики упругих волн, распространяющихся в слоистой пьезокристаллической структуре.

7. Рассмотреть особенности влияния внешнего статического воздействия на взаимодействие (гибридизацию) между модами упругой волны в пьезоэлектрической пластине либо в слоистой структуре.

Достоверность полученных в представленной диссертации теоретических результатов определяется корректностью постановки всех граничных условий, использованием точных вычислительных методов, а также количественным и качественным соответствием полученных в работе теоретических результатов с экспериментальными данными других авторов.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

В результате проведенных в диссертационной работе исследований:

1. Впервые получены энергетические соотношения, описывающие распространение объемных и поверхностных акустических волн в пьезокристаллах, подвергнутых влиянию внешних статических воздействий. Продемонстрирована трансформация типа упругих волн при статической деформации пьезоэлектрической среды. В частности, обнаружена трансформация особой объемной волны в волну Блюстейна-Гуляева при воздействии внешнего электрического поля на кристалл.

2. Исследовано влияние статических внешних воздействий на акустическую ось в пьезокристалле. Показано, что в окрестности точки вырождения (акустическая ось)

изменение величины фазовой скорости ОАВ под внешними статическими воздействиями описывается с помощью разложения в ряд Пюизье по дробно-степенным значениям от величины воздействия.

3. Впервые исследовано влияние внешних статических воздействий (электрического поля и одноосного механического напряжения) на отражение и преломление ОАВ от границы раздела «кристалл-вакуум» и «кристалл-кристалл» при различных вариантах типа падающей волны. Продемонстрировано, что вследствие изменения эффективной симметрии кристалла при приложении внешних статических воздействий, особенно в окрестности акустических осей, может происходить трансформация типа отраженных и преломленных волн.

4. Проведен теоретический анализ изменения дисперсионных характеристик, как нулевых мод волн Лэмба, так и мод более высокого порядка в пластинах кристаллов кубической и тригональной группы симметрии при различных вариантах приложения внешнего электрического поля.

5. Впервые продемонстрировано, что внешние статические воздействия вследствие изменения эффективной симметрии кристалла могут приводить как в пьезопластине, так и в слоистой пьезоструктуре к трансформации объёмной акустической волны в упругую волну поверхностного типа – в слабо дисперсионную поверхностную моду типа «Анисимкина-мл.».

6. Впервые выполнен анализ влияния внешнего электрического поля на взаимодействие (гибридизацию) мод акустической волны в пластине пьезокристалла и слоистой пьезоструктуре. Продемонстрирован механизм смены типа моды упругой волны при гибридизации.

7. Впервые выполнено исследование анизотропии температурных зависимостей параметров мод волны Лэмба и мод SH -волны в пластинах кристалла лангасита.

8. Впервые выполнен анализ дисперсионной зависимости характеристик упругой волны, распространяющейся в слоистых пьезоэлектрических структурах « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленый кварц», « $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленый кварц» и «плавленый кварц/ LiNbO_3 », подвергнутых внешним статическим воздействиям (однородное электрическое поле, одноосное механическое давление).

9. Впервые выполнен анализ значимости вклада физической и геометрической нелинейности в изменение характеристик упругой волны вследствие внешнего механического напряжения.

Практическая значимость полученных результатов

1. Выполнен анализ анизотропии характеристик распространения ОАВ и ПАВ: коэффициентов управляемости фазовых скоростей, векторов поляризации упругой волны, групповых скоростей и углов отклонения потока энергии от волновой нормали при различных вариантах приложения внешнего воздействия (электрического поля и механического давления) в кристаллах силикосилленита, ниобата лития, лангасита и алмаза, которые представляют особый интерес для создания устройств акустоэлектроники.

2. Выполнен детальный анализ изменения дисперсионных характеристик волн Лэмба и *SH*-волны в пластинах кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ при различных вариантах приложения внешнего электрического поля к пьезопластине. Указаны направления с максимальными и минимальными проявлениями влияния внешнего электрического поля на характеристики упругой волны. Представлена оценка создания управляемой линии задержки сигнала, например ($\Delta t = \pm 3,85$ нс при $\Delta E = 1 \cdot 10^7$ В/м) на симметричной моде S_0 волны Лэмба в X-срезе кристалла лангасита.

3. Выполнен теоретический анализ температурных зависимостей характеристик упругой волны в пластине кристалла лангасита в базовых и повернутых срезах. Отмечены наиболее перспективные направления распространения упругой волны с термостабильными свойствами в пластине кристалла лангасита. Выполнен анализ возможности компенсации температурных флуктуаций фазовых скоростей упругой волны приложением внешнего электрического поля, что может представлять особый интерес для создания высокостабильных устройств акустоэлектроники.

4. Выполнен анализ дисперсионной зависимости характеристик упругой волны при различных вариантах приложения внешнего электрического поля либо одноосного механического давления в пьезоэлектрических слоистых структурах « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленый кварц», « $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленый кварц», «плавленый кварц/ LiNbO_3 » и « AlN /алмаз». Отмечены наиболее перспективные срезы и направления распространения акустической волны для создания акустоэлектронных устройств, сочетающие существенное значение КЭМС, малую величину отклонения потока энергии (PFA) и значимые величины коэффициентов управляемости α_v . Продемонстрирована принципиальная возможность управлять распространением моды упругой волны в слоистой структуре по принципу «вкл/выкл» приложением внешнего электрического поля к структуре.

5. Выполнен анализ значимости вклада физической и геометрической нелинейности, вызванной приложением внешнего механического напряжения к слоистой пьезоструктуре

в зависимости от варианта учета данного воздействия на слой, что важно при проектировании устройств пьезотехники.

6. Создан программный комплекс, состоящий из ряда программных продуктов и позволяющий рассчитать характеристики упругих волн различных типов (ОАВ, ПАВ Рэлея, Лява и Блюстейна-Гуляева, нормальных мод волны Лэмба) в монокристалле, в пластине пьезоэлектрика и многослойной пьезоэлектрической системе – как в случае «линейного» кристалла произвольной точечной группы симметрии, так и в подвергнутом воздействию однородного внешнего электрического поля и одноосного механического давления. Разработанные программы позволяют также решать задачи определения анизотропии параметров распространения волн, включая влияние анизотропии внешних воздействий.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Результаты теоретического исследования акустических свойств объемных и поверхностных акустических волн в пьезокристалле, подвергнутому внешнему статическому воздействию электрического поля или механического одноосного давления.

2. Эффект трансформации типа отраженных и преломленных акустических волн от границы раздела «кристалл-вакуум» и от границы раздела двух кристаллов при приложении внешнего статического воздействия.

3. Механизм смены типа моды упругой волны в пластине пьезокристалла в области взаимодействия (гибридизации) мод акустической волны при влиянии внешнего электрического поля на распространение волн Лэмба и *SH*-волны в пьезопластине.

4. Эффект трансформации объемной волны в волну поверхностного типа вследствие воздействия внешнего электрического поля на слоистую пьезоструктуру.

5. Результаты расчета температурных зависимостей фазовых скоростей упругих волн в пластине кристалла лангасита.

6. Результаты теоретического исследования качественных и количественных изменений внешними статическими воздействиями (электрического поля и одноосного механического напряжения) эффективных электромеханических свойств и параметров распространения упругих волн в слоистой пьезоструктуре. Управление распространением моды упругой волны в слоистой пьезоструктуре по принципу «вкл/выкл» при воздействии внешнего электрического поля и соответствующим подбором материалов слоя и подложки.

7. Результаты исследования учета значимости вклада физической и геометрической нелинейности в изменение характеристик упругой волны, вызванной приложением внешнего механического напряжения к слоистой пьезоструктуре.

Личный вклад соискателя. Представленные в диссертации результаты получены впервые автором, под его руководством или при его непосредственном участии. Постановка задачи и обсуждение результатов проводились совместно с научным консультантом акад. Александровым К.С., а также с проф. Сорокиным Б.П. Часть работы выполнена в соавторстве с Золотовой О.П., защитившей под руководством автора диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работы, посвященные исследованию акустических свойств кристалла лангасита, были выполнены совместно с Турчиным П.П., который проводил экспериментальные исследования линейных и нелинейных свойств кристалла лангасита.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах.

1. XII Всесоюзная конференция по акустоэлектронике и квантовой акустике, Саратов, 1983 г.;
2. II Всесоюзная конференция «Актуальные проблемы получения и применения сегнето- и пьезоэлектрических материалов», Москва, 1984 г.;
3. II International Symposium On Surface Waves in Solids and Layered Structures (ISSWAS'89), (Varna, Bulgaria), 1989 г.;
4. I и II Всесоюзная конференция «Реальная структура и свойства ацентричных кристаллов», Александров, 1990 г., 1995 г.;
5. III и IV международная конференция «Кристаллы: рост, свойства, реальная структура и применение», Александров, ВНИИСИМС, 1997 г., 1999 г.;
6. 1995 IEEE International Ultrasonics Symposium (Seattle, USA), November 7-10, 1995;
7. 1996 IEEE International Frequency Control Symposium (Honolulu, USA), June 5-7, 1996;
8. 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium (Beijing, China), November 2-5, 2008;
9. 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium (San Diego, California, USA), October 11-14, 2010;
10. IEEE Inter. Frequency Control & European Frequency and Time Forum (San Francisco, California, USA), May 1-5, 2011;
11. Конференция «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV Сессия Российского акустического общества», Саратов, 2011;
12. Конференция «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV Сессия Российского акустического общества», Таганрог, 2012;

13. 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium (Dresden, Germany), October 7-10, 2012;
14. Международный симпозиум «Физика кристаллов 2013». Москва, МИСиС, 29 октября – 02 ноября 2013 г.

Работа выполнена на кафедре «Физики твердого тела и нанотехнологий» Сибирского федерального университета и частично при поддержке «Программы РФ по поддержке ведущих научных школ РФ» (грант НШ-1011.2008.2), (грант НШ-4645.2010.2), (грант НШ-4828.2012.2); ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (гос. контракт № 16.513.12.3025); Государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2014, 2015 годах (Задание № 3.2534.2014/К).

Публикация результатов. Список работ по теме диссертации включает 60 наименований, в том числе: двухтомная коллективная монография, в которой автором написаны 2 и 10 Главы; 31 статья, из которых 26 опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК и индексируемых Web of Science; 14 – материалы международных и всероссийских конференций и симпозиумов; 5 – тезисы международных и всероссийских конференций; 8 – Свидетельства на программные продукты.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из Введения, 7-ми глав, Заключения, Списка литературы и Приложений. Полный объем диссертации составляет 273 страниц текста, в том числе рисунков – 101, таблиц – 9, библиографический список цитируемой литературы – 344 наименования.

Во введении приведен аналитический обзор литературы, посвященный современному состоянию проблемы. Обоснована актуальность выбранной темы диссертации, описана степень новизны и практической значимости полученных результатов работы.

В первой главе приведено термодинамическое описание деформированной пьезоэлектрической среды при распространении акустических волн при внешних статических воздействиях. На основании представлений, развитых в работах Терстона, Тиерстона и др. [3, 4], в материальном представлении приведены термодинамические потенциалы, их полные дифференциалы и первые производные, для пьезоэлектрической среды, подвергнутой внешним статическим воздействиям. Представлены уравнения

состояния и уравнения движения пьезоэлектрической среды, подвергнутой влиянию однородных внешних статических воздействий.

Волновые уравнения, описывающие распространение упругой волны малой амплитуды в однородно-деформированных средах с пьезоэффектом, могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned}\rho_0 \ddot{\tilde{U}}_M &= \tilde{\tau}_{LM,L} + \tilde{U}_{M,AB} \bar{\tau}_{AB}, \\ D_{L,L} &= 0.\end{aligned}\quad (1)$$

Уравнения состояния пьезоэлектрической среды для электрической энтальпии при распространении высокочастотных упругих волн и адиабатических условий имеют вид:

$$\begin{aligned}\tilde{\tau}_{AB} &= C_{ABCD}^* \tilde{\eta}_{CD} - e_{MAB}^* \tilde{E}_M, \\ \tilde{D}_M &= \varepsilon_{MN}^* \tilde{E}_N + e_{MAB}^* \tilde{\eta}_{AB},\end{aligned}\quad (2)$$

где использованы эффективные материальные константы в виде

$$\begin{aligned}C_{ABKL}^* &= C_{ABKL}^E + (C_{ABKLQR}^E d_{JQR} - e_{JABKL}) M_J \bar{E} - C_{ABKLQR}^E S_{QRMN}^E P_M P_N \bar{\tau}, \\ e_{NAB}^* &= e_{NAB} + (e_{NABKL} d_{JKL} + H_{NJAB}) M_J \bar{E} - e_{NABKL} S_{KLMN}^E P_M P_N \bar{\tau}, \\ \varepsilon_{NM}^* &= \varepsilon_{NM}^\eta + (H_{NMAB} d_{PAB} + \varepsilon_{NMP}^\eta) M_P \bar{E} - H_{NMAB} S_{ABKL}^E P_K P_L \bar{\tau}.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь ε^* – эффективная диэлектрическая проницаемость в данном направлении при выбранной ориентации электрического поля; $C_{ABCD}^E, C_{ABCDQR}^E, S_{ABCD}^E, e_{NAB}, e_{NABCD}, d_{NFC}, \varepsilon_{PQ}, \varepsilon_{PQJ}, H_{PQAB}$ – линейные и нелинейные упругие, пьезоэлектрические, диэлектрические и электрострикционные материальные тензоры; M_J, P_J – единичные векторы ориентации постоянного электрического поля и оси напряжения $\bar{E}, \bar{\tau}$.

Модифицированные уравнения Грина-Кристоффеля для упругих волн малой амплитуды в однородно-деформированной среде, записанные в координатах начального состояния, имеют вид:

$$\left[\Gamma_{BC}(\bar{E}, \bar{\tau}) - \rho_0 v^2 \delta_{BC} \right] \tilde{U}_B = 0. \quad (4)$$

При приложении внешнего электрического поля компоненты тензора Грина-Кристоффеля $\Gamma_{BC}(\bar{E})$ являются функциями статического электрического поля:

$$\Gamma_{BC}(\bar{E}) = \bar{C}_{FC} \left(C_{ABFD}^* + \frac{e_{MFD}^* e_{SAB}^* N_M N_S}{\varepsilon_{PQ}^* N_P N_Q} \right) N_A N_D. \quad (5)$$

При воздействии одноосного механического давления компоненты тензора Грина-Кристоффеля являются функциями внешнего механического напряжения:

$$\Gamma_{BC}(\bar{\tau}) = \left[\bar{C}_{FC} \left(C_{ABFD}^* + \frac{e_{MFD}^* e_{NAB}^* N_M N_N}{\varepsilon_{PQ}^* N_P N_Q} \right) + \bar{\tau}_{AD} \delta_{BC} \right] N_A N_D. \quad (6)$$

где $\bar{C}_{FC}$ – тензор статических деформаций Грина. При описании влияния электрического поля или одноосного механического давления на свойства и распространение акустических волн в «линейных» пьезоэлектриках достаточно оставить в (5), (6) только члены, пропорциональные первой степени ($\bar{E}$, $\bar{\tau}$). Линеаризованные уравнения Грина – Кристоффеля при приложении внешнего электрического поля $\bar{E}$ и однородного одноосного механического напряжения $\bar{\tau}_{KL} = -\bar{\tau}_K P_L$ к пьезокристаллу запишутся в виде:

$$\Gamma_{BC} = \Gamma_{BC}^{ynp} + \frac{e_B^I e_C^{II}}{\varepsilon^*}, \quad (7)$$

где:

$$\begin{aligned} \Gamma_{BC} &= \left[C_{ABCD}^* + 2d_{JFC} C_{ABFD}^E M_J E + (2C_{MBFN}^E S_{ADCF}^E + \delta_{BC} \delta_{AM} \delta_{DN}) P_M P_N \bar{\tau} \right] N_A N_D, \\ e_C^I &= e_{ADC}^* N_A N_D, \\ e_C^{II} &= e_C^I + 2e_{APD} \left(d_{JPC} M_J E + S_{MNC P}^E P_M P_N \bar{\tau} \right) N_A N_D, \\ \varepsilon^* &= -\varepsilon_{IJ}^* N_I N_J. \end{aligned} \quad (8)$$

В (7) e_B^I и e_C^{II} – векторы пьезоэлектрического эффекта.

Уравнения (7) – (8) записаны в координатах исходного недеформированного состояния системы, что значительно облегчает интерпретацию результатов. В общем случае модифицированный тензор Грина-Кристоффеля несимметричен, кроме некоторых высокосимметричных направлений распространения ОАВ в кристалле, что с физической точки зрения обусловлено конечной деформацией кристалла при внешнем статическом воздействии $\bar{E}$, $\bar{\tau}$ за счет обратного пьезоэффекта.

Для количественной оценки изменения фазовых скоростей упругой волны при приложении внешнего статического воздействия удобно использовать коэффициенты управления фазовой скоростью упругой волны электрическим полем или одноосным механическим давлением:

$$\alpha_{v_i}^E = \frac{1}{v_i(0)} \left(\frac{\Delta v_i}{\Delta \bar{E}} \right)_{\Delta \bar{E} \rightarrow 0}, \quad \alpha_{v_i}^\tau = \frac{1}{v_i(0)} \left(\frac{\Delta v_i}{\Delta \bar{\tau}} \right)_{\Delta \bar{\tau} \rightarrow 0}. \quad (9)$$

Получены аналитические выражения для потока энергии ОАВ и ПАВ в пьезоэлектрической среде, подвергнутой воздействию внешнего статического воздействия. Например, групповая скорость ОАВ в пьезоэлектрическом кристалле при приложении внешнего электрического поля имеет вид:

$$s_B = \frac{1}{\rho_0 v} \left[C'_A + \frac{(e'_A \hat{e})}{\varepsilon^*} - \frac{\hat{e} e^* \varepsilon_{AS}^* N_S}{(\varepsilon^*)^2} \right], \quad (10)$$

где

$$C'_A = (C_{ABCD}^* \tilde{U}_D^0 + 2d_{JGD} C_{ABCD}^E \tilde{U}_G^0 M_J \bar{E}) N_C \tilde{U}_B^0,$$

$$e'_A = (e_{JAC}^* + e_{ACJ}^*) N_J \tilde{U}_C^0,$$

$$\hat{e} = (e_{QDL}^* \tilde{U}_D^0 + 2d_{JGD} e_{QDL} \tilde{U}_G^0 M_J \bar{E}) N_Q N_L,$$

$$e^* = e_{QDL}^* \tilde{U}_D^0 N_Q N_L,$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{IJ}^* N_I N_J.$$

На примере кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ выполнен детальный анализ влияния внешнего воздействия на изменения параметров ОАВ в окрестности акустической оси. Выполнен анализ снятия вырождения, расщепления акустической оси и т.п. в пьезокристалле при воздействии внешнего электрического поля. Показано, что в окрестности точки вырождения (акустическая ось) изменения собственных значений (фазовой скорости) ОАВ при воздействии внешнего статического поля описываются с помощью разложения в ряд Пуизье по дробно-степенным значениям от величины воздействия. Продемонстрирована топология изменения поляризационных полей упругих волн в пьезокристалле в окрестности акустической оси при внешнем статическом воздействии.

Представлен расчет анизотропии характеристик ОАВ (коэффициенты управляемости, углы отклонения векторов поляризации и потока энергии, коэффициенты электромеханической связи) в базовых плоскостях кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BGO), $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS) и алмаза при воздействии внешнего электрического поля или одноосного механического давления на кристалл. Продемонстрировано, что изменение характера акустических свойств, вследствие воздействия на кристалл, соответствует принципу симметрии Кюри.

Для описания распространения ПАВ в пьезокристалле, подвергнутому внешнему воздействию, необходимо записать граничные условия. Граничными условиями для механических величин являются отсутствие напряжений на поверхности кристалла. Для электрических величин необходимо потребовать непрерывность нормальной компоненты вектора электрической индукции на границе «кристалл – вакуум». В рабочей системе координат, в которой ось X_3 направлена вдоль нормали к свободной поверхности, и ось X_1 – вдоль направления распространения упругой волны, данные условия можно представить в виде

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_{3J} \big|_{X_3=0} &= 0. \\ \left\{ \begin{aligned} \tilde{D}_3^{\text{бак}} &= -\varepsilon_0 \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial X_3} & (X_3 > 0), \\ \tilde{D}_3^{\text{кр}} &= e_{3KL}^* \tilde{C}_{GK} \frac{\partial \tilde{U}_G}{\partial X_L} - \varepsilon_{3M}^* \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial X_M} & (X_3 < 0), \\ \tilde{D}_3^{\text{кр}} &= \tilde{D}_3^{\text{бак}} & (X_3 = 0). \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (11)$$

Равенство нулю определителя системы уравнений (11) определяет скорость ПАВ в условиях приложения внешнего электрического поля $\bar{E}$:

$$\begin{aligned} G_{In} &= (C_{3IKL}^* + 2d_{JKP} C_{3IPL}^E M_J \bar{E}) N_L^{(n)} \alpha_K^{(n)} + e_{P3I}^* N_P^{(n)} \alpha_4^{(n)}, \\ G_{4n} &= (e_{3KL}^* + 2d_{JKP} e_{3PL} M_J \bar{E}) N_L^{(n)} \alpha_K^{(n)} - (\varepsilon_{3K}^* N_K^{(n)} - i\varepsilon_0) \alpha_4^{(n)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где заглавные латинские координатные индексы принимают значения от 1 до 3, $n = 1, \dots, 4$ – номер парциальной моды, i – мнимая единица, ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Определитель системы граничных условий при приложении одноосного механического давления имеет вид:

$$\begin{aligned} G_{Bn} &= [C_{3BKL}^E \delta_{KP} - P_M P_N \tau (2S_{KPMN}^E C_{3BKL}^E + \delta_{KP} C_{3BKLQR}^E S_{QRMN}^E)] N_L^{(n)} \alpha_P^{(n)} - \\ &\quad - (e_{J3B} - e_{J3BKL} S_{KLMN}^E P_M P_N \tau) N_J^{(n)} \alpha_4^{(n)} + N_J^{(n)} \alpha_B^{(n)} P_3 P_J \tau, \\ G_{4n} &= -(e_{3KL} + e_{3KLQR} S_{QRMN}^E P_M P_N \tau) N_K^{(n)} \alpha_L^{(n)} - \\ &\quad - (\varepsilon_{3K}^n + H_{3KMN} P_M P_N \tau) N_K^{(n)} \alpha_4^{(n)} + \varepsilon_0 \alpha_4^{(n)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Изложен анализ влияния внешних воздействий на свойства поверхностных акустических волн и предельную скорость в кристаллах группы симметрии 23. Продемонстрировано на примере кристаллов группы симметрии 23, что воздействие внешнего электрического поля на волну Блюстейна-Гуляева приводит к трансформации в четырехпарциальную волну, либо численно изменяются характеристики этой волны.

Выполнен расчет и анализ анизотропии характеристик ПАВ (коэффициентов управляемости фазовых скоростей, коэффициентов электромеханической связи (КЭМС) и углов отклонения потока энергии упругой волны от сагиттальной плоскости) для кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, LiNiO_3 и алмаза при различных вариантах воздействия внешнего электрического поля или одноосного механического давления. Для совпадающих расчетных и экспериментальных ситуаций получено хорошее соответствие результатов. Например, на рисунке 1 представлены графики коэффициентов управляемости при приложении механического давления к кристаллу кварца в ST-срезе и Y-срезе. Точками указаны литературные экспериментальные данные [5].

В завершение первой главы представлен детальный анализ области применения линейного приближения в теории влияния внешних статических воздействий на распространение упругих волн в пьезоэлектрических кристаллах. Показано, что в общем случае линейная зависимость характеристик упругой волны от величины внешнего воздействия практически сохраняется до значений $\bar{E} \approx 10^8$ В/м и $\bar{\tau} \approx 5 \cdot 10^8$ Па. Однако дополнительным ограничением применяемой теории линейного характера изменения свойств упругой волны может быть как возникающая геометрическая нелинейность, связанная со статической деформацией кристалла, так и сочетание значений пьезоэлектрических и электрострикционных констант пьезокристалла.

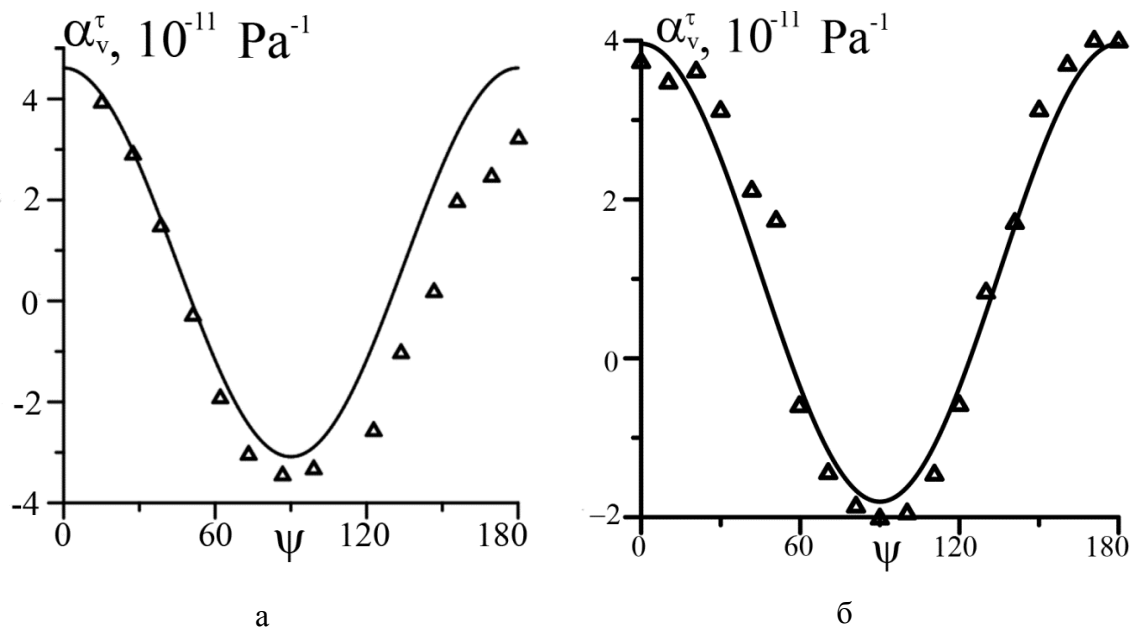


Рисунок 1 - Коэффициенты управляемости ПАВ в кристалле кварца в зависимости от азимутального угла вектора внешнего одноосного давления: а) ST-срез; б) Y-срез. Треугольниками отмечены экспериментальные значения α_v

Во второй главе на основе термодинамических уравнений состояния конечно-деформированной пьезоэлектрической среды, приведенных в первой главе, были записаны граничные условия отражения объемной акустической волны от границы раздела кристалл - вакуум и от границы раздела двух пьезоэлектрических кристаллов, подвергнутых воздействию внешнего электрического поля.

В случае жесткого акустического контакта двух кристаллов граничные условия для тензора термодинамических напряжений сводятся к требованию непрерывности нормальных компонент тензоров напряжений отраженных и преломленных волн и непрерывности векторов упругих смещений, а также условия непрерывности касательных

к поверхности раздела компонент вектора напряженности электрического поля и непрерывности нормальных компонент вектора индукции:

$$\begin{aligned} \tau_{ik}^{(1)} n_k &= \tau_{ik}^{(2)} n_k, \quad \varphi^{(1)} = \varphi^{(2)}, \\ \vec{U}^{(1)} &= \vec{U}^{(2)}, \quad (\vec{D}^{(1)}, \vec{n}) = (\vec{D}^{(2)}, \vec{n}), \end{aligned} \quad (14)$$

где n_k – единичный вектор нормали к границе раздела. Для плоской упругой гармонической волны и волны электрического потенциала, записанных с помощью векторов рефракции, система уравнений в рабочей системе координат запишется в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{\mu=1}^4 (b_{\mu} G_{\mu i}^{(1)} - a_{\mu} G_{\mu i}^{(2)}) &= G_{0i}^{(2)}, \\ \sum_{\mu=1}^4 (U_i^{(1)(\mu)} b_{\mu} - U_i^{(2)(\mu)} a_{\mu}) &= U_i^0, \\ \sum_{\mu=1}^4 (b_{\mu} D^{(1)(\mu)} - a_{\mu} D^{(2)(\mu)}) &= D_0^{(2)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где a_{μ} – амплитудные коэффициенты отражения, b_{μ} – амплитудные коэффициенты преломления, а также приняты обозначения:

$$\begin{aligned} G_{\mu l}^{(1,2)} &= (C_{I3KL}^{(1,2)*} + 2d_{AKF}^{(1,2)} C_{3IFL}^{(1,2)E} M_A E) m_L^{(\mu)} U_K^{(\mu)} + e_{3PI}^{(1,2)*} m_P^{(\mu)} U_4^{(\mu)}, \\ D_{\mu}^{(1,2)} &= (e_{3KL}^{(1,2)*} + 2d_{JKP}^{(1,2)} e_{3PL}^{(1,2)} M_J E) m_L^{(\mu)} U_K^{(\mu)} - \varepsilon_{3K}^{(1,2)*} m_K^{(\mu)} U_4^{(\mu)}. \end{aligned} \quad (16)$$

В (15) и (16) верхний индекс «1» относится к кристаллу, занимающему полупространство $X'_3 > 0$, индекс «2» – к полупространству $X'_3 < 0$, индекс «0» определяет падающую упругую волну.

Рассматривая только отражение волны от границы раздела «кристалл-вакуум», необходимо изменить граничные условия. В этом случае для механических величин должны отсутствовать напряжения на поверхности кристалла, т.е. $\sum \tilde{\tau}_{3j} = 0 \mid_{X_3=0}$. Для электрических величин граничными условиями являются непрерывность нормальной компоненты электрической индукции на границе раздела «кристалл-вакуум» и выполнение уравнения Лапласа для волны потенциала в вакууме.

Представлен анализ отражения ОАВ от границы раздела «кристалл – вакуум» на примере кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и ниобата лития при различных вариантах типа падающей волны и приложения внешнего электрического поля. Например, в случае падения продольной или быстрой сдвиговой волны (поляризованной в плоскости падения) на границу раздела «кристалл – вакуум» в плоскости (010) кристалла точечной группы симметрии 23 отражаться будут только продольная (QL) и быстрая сдвиговая (QFS)

волны, а при падении медленной сдвиговой волны (QSS) отражается только QSS-волна практически с той же амплитудой (рисунок 2,а). Приложение к кристаллу $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ электрического поля вдоль направления $[001]$, согласно принципу Кюри, понижает симметрию кристалла точечной группы симметрии до моноклинной класса 2, где ось симметрии второго порядка направлена также вдоль $[001]$, вследствие чего индуцируются новые эффективные материальные постоянные, равные нулю в отсутствие поля. В результате происходит снятие вырождения (акустическая ось) фазовых скоростей, рассмотренное ранее, что приводит к появлению отраженной медленной сдвиговой волны QSS (рисунок 2, б). Однако даже нормальное падение QSS-волны при воздействии внешнего электрического поля приводит к появлению отраженных сдвиговых волн обоих типов со значениями вещественных частей амплитудных коэффициентов 0,78 и 0,71 для быстрой и медленной сдвиговых волн, соответственно (рисунок 2, в). Следует отметить, что при всех вариантах падения волн в случае приложения электрического поля значения амплитудных коэффициентов отраженных волн всегда являются комплексными.

Выполнен расчет и анализ отражения и преломления объемных акустических волн от границы раздела двух кристаллических сред на примере «плавленный кварц - $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ » и « LiNbO_3 - $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ » при приложении внешнего электрического поля к структуре и при различных вариантах типа падающей волны. Отмечены случаи трансформации типа преломленных и отраженных волн при приложении внешнего электрического поля к кристаллам.

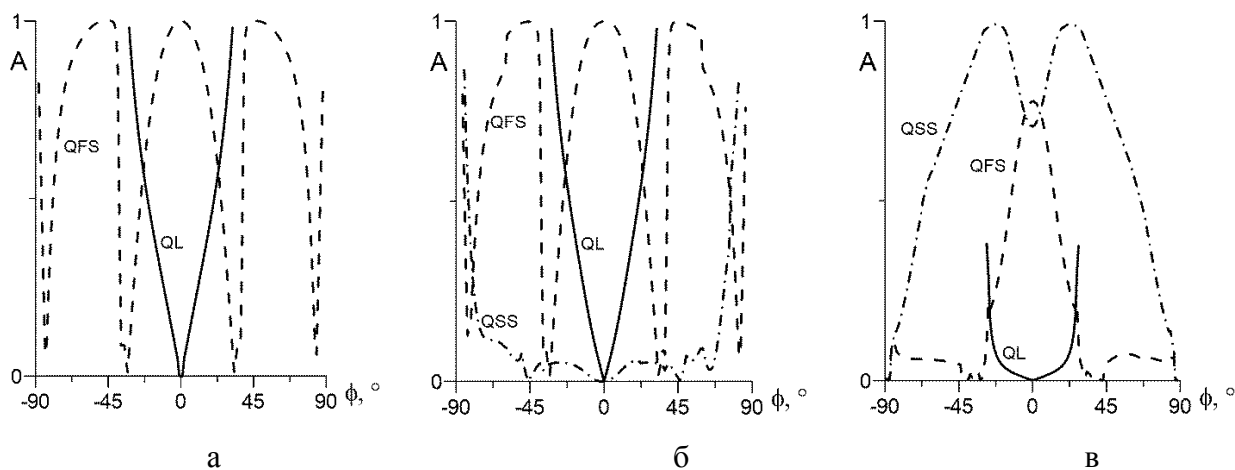


Рисунок 2 - Амплитудные коэффициенты отражения ОАВ от границы раздела «кристалл – вакуум» для германосилленита в плоскости (010) при падении быстрой сдвиговой волны: а) $\vec{E} = 0$; падающая – QFS; б) $E \parallel [001]$; падающая – QFS; в) $E \parallel [001]$; падающая – QSS

В третьей главе приведены граничные условия отражения и преломления ОАВ от границы раздела «кристалл – вакуум» и от границы раздела двух пьезоэлектрических

кристаллов, подвергнутых воздействию внешнего одноосного механического давления. Граничные условия при приложении механического напряжения в случае жесткого акустического контакта двух кристаллов формулируются аналогично (14). Однако система уравнений (15) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
G_{Bn}^{(1,2)} &= (C_{B3KL}^{(1,2)*} \delta_{KP} - 2S_{KPMN}^{(1,2)E} C_{3BKL}^{(1,2)E} P_M P_N \bar{\tau}) m_L^{(n)} \alpha_P^{(n)} - e_{P3B}^{(1,2)*} m_P^{(n)} \alpha_4^{(n)} + \\
&\quad m_P^{(n)} \alpha_B^{(n)} P_3 P_P \bar{\tau}, \\
D_n^{(1,2)} &= (e_{3AB}^{(1,2)*} + 2S_{ABKP}^{(1,2)E} e_{3AB}^{(1,2)E} P_F P_P \bar{\tau}) m_B^{(n)} \alpha_A^{(n)} - \varepsilon_{3K}^{(1,2)*} m_K^{(n)} \alpha_4^{(n)}, \\
G_{B0}^{(2)} &= (C_{B3KL}^{(2)*} \delta_{KP} - 2S_{KPMN}^{(2)E} C_{3BKL}^{(2)E} P_M P_N \bar{\tau}) m_L^{(0)} \alpha_P^{(0)} - e_{P3B}^{(1,2)*} m_P^{(0)} \alpha_4^{(0)} + \\
&\quad m_P^{(0)} \alpha_B^{(0)} P_3 P_P \bar{\tau}, \\
D_0^{(2)} &= (e_{3AB}^{(2)*} + 2S_{ABKP}^{(2)E} e_{3AB}^{(2)E} P_F P_P \bar{\tau}) m_B^{(0)} \alpha_A^{(0)} - \varepsilon_{3K}^{(2)*} m_K^{(0)} \alpha_4^{(0)}.
\end{aligned} \tag{17}$$

Рассматривая только отражение волны от границы раздела «кристалл-вакуум» и предполагая, что одноосное напряжение в данной геометрии осуществляется без жесткого упругого контакта со свободной поверхностью, механические граничные условия могут быть записаны в виде $\tilde{\tau}_{3J} = 0 \mid_{x_3=0}$. Для электрических величин граничными условиями являются непрерывность нормальной компоненты электрической индукции на границе раздела «кристалл-вакуум» и выполнение уравнения Лапласа для волны потенциала в вакууме. Система линейных уравнений для определения четырех амплитудных коэффициентов отраженных волн будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
&\sum_{n=1}^3 -a_n \left\{ (C_{B3KL}^{(2)*} \delta_{KP} - 2S_{KPMN}^{(2)E} C_{3BKL}^{(2)E} P_M P_N \bar{\tau}) m_L^{(n)} \alpha_P^{(n)} + m_P^{(n)} \alpha_B^{(n)} P_3 P_P \bar{\tau} \right\} + \\
&\quad + a_4 e_{P3B}^{(2)*} m_P^{(n)} \alpha_4^{(n)} = \\
&= (C_{B3KL}^{(2)*} \delta_{KP} - 2S_{KPMN}^{(2)E} C_{3BKL}^{(2)E} P_M P_N \bar{\tau}) m_L^{(0)} \alpha_P^{(0)} + m_P^{(0)} \alpha_B^{(0)} P_3 P_P \bar{\tau} - a_4 e_{P3B}^{(0)*} m_P^{(0)} \alpha_4^{(0)} \\
&\sum_{n=1}^3 a_n \left\{ (e_{3AB}^{(2)*} + 2S_{ABKP}^{(2)E} e_{3AB}^{(2)E} P_F P_P \bar{\tau}) m_B^{(n)} \alpha_A^{(n)} \right\} - a_4 (\varepsilon_{3K}^{(2)*} m_K^{(n)} - i\varepsilon_0) \alpha_4^{(n)} = \\
&= (e_{3AB}^{(2)*} + 2S_{ABKP}^{(2)E} e_{3AB}^{(2)E} P_F P_P \bar{\tau}) m_B^{(0)} \alpha_A^{(0)} - \varepsilon_{3K}^{(2)*} m_K^{(0)} \alpha_4^{(0)}.
\end{aligned} \tag{18}$$

В случае приложения напряжений ортогонально свободной поверхности должны быть приняты во внимание упругие свойства нагружающей среды. Тем не менее, если гипотетически предположить, что одноосное напряжение в данной геометрии осуществляется без жесткого упругого контакта со свободной поверхностью, для этого

случая механические граничные условия могут быть записаны в виде $\tilde{\tau}_{3J} + \tilde{U}_{J,K} \tau_{3K} = 0 \big|_{x_3=0}$.

Для сравнения влияний внешних воздействий на свойства отражения ОАВ в качестве примера рассмотрим влияние внешнего одноосного механического напряжения на отражение ОАВ от свободной границы кубического пьезоэлектрика симметрии 23, аналогично влиянию внешнего однородного электрического поля. Приложение к кристаллу внешнего одноосного механического напряжения вдоль направления [100], согласно принципу Кюри, понижает симметрию кристалла до ромбической класса 222, в отличие от приложения к кристаллу электрического поля, которое понижает симметрию кристалла до моноклинной класса 2. Вследствие этого, происходит только модификация существующих материальных постоянных, но с другими численными данными. Приложение к кристаллу одноосного давления вдоль направления [100] приводит к снятию вырождения касательного типа вдоль кристаллографических осей типа [001]. Вследствие расщепления акустической оси при падении продольной волны в интервале между наведенными акустическими осями отражается медленная сдвиговая QSS-волна, т.е. в растворе конуса наведенных акустических осей происходит «обмен» сдвиговых упругих волн (рисунок 3). Данная ситуация более ярко выражена в плоскости (110) при приложении к кристаллу давления вдоль направления [110], т.е. вдоль границы раздела.

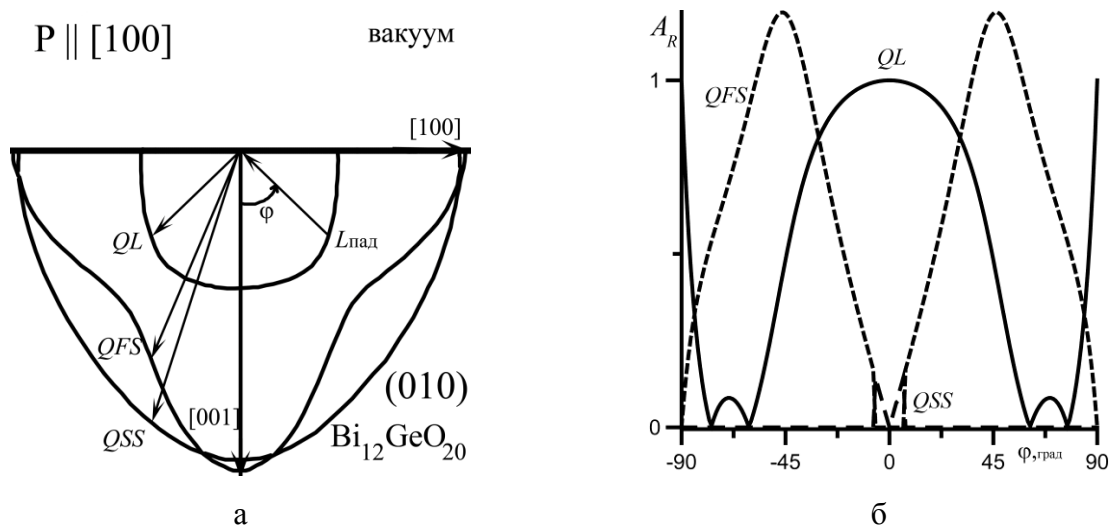


Рисунок 3 - Амплитудные коэффициенты отражения ОАВ от границы раздела кристалл–вакуум для германосилленита в плоскости (010) при падении продольной волны: а) полость рефракции; б) $P \parallel [100]$

На примере структур «плавленный кварц – $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ » и «ниобат лития – $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ » выполнен расчет и анализ отражения и преломления ОАВ от границы раздела двух кристаллических сред при приложении внешнего одноосного механического давления. Продемонстрировано, что максимальные изменения амплитудные коэффициенты

отраженных волн в системе кристаллов « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20} - \text{LiNbO}_3$ » при приложении внешнего одноосного давления P происходят в окрестности акустической оси вследствие снятия вырождения сдвиговых волн в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, в то время как величины амплитудных коэффициентов преломленных упругих волн изменяются незначительно.

В четвертой главе выполнен анализ характеристик распространения упругой волны в пластине пьезоэлектрического кристалла, подвергнутого воздействию внешнего электрического поля. Для определения характеристик распространения поверхностной акустической упругой волны в пьезокристаллической пластине, подвергнутой воздействию внешнего однородного электрического поля, необходимо записать граничные условия. В рабочей системе координат, в которой ось X_3 направлена вдоль внешней нормали к поверхности кристаллической пластины, занимающей пространство $X_3 \leq h$, и $X_3 \geq 0$, а ось X_1 совпадает с направлением распространения волны, распространение акустических волн в пьезоэлектрической пластине толщины h должно удовлетворять граничным условиям равенства нулю нормальных компонент тензора напряжений на границах раздела «кристалл-вакуум», непрерывности нормальных компонент вектора напряженности электрического поля и непрерывности электрического потенциала φ :

$$\begin{aligned} \tau_{3k} &= 0 \quad \text{при } x_3 = 0; \quad x_3 = h; \\ \varphi &= \varphi^{[I]} \quad \text{при } x_3 < 0; \quad \varphi = \varphi^{[II]} \quad \text{при } x_3 > h; \\ D &= D^{[I]} \quad \text{при } x_3 < 0; \quad D = D^{[II]} \quad \text{при } x_3 > h. \end{aligned} \quad (19)$$

Верхний индекс « I » относится к полупространству $X'_3 > h$, индекс « II » – к полупространству $X'_3 < 0$.

Получены дисперсионные уравнения для волн Лэмба и SH – волны, распространяющихся вдоль направления $[100]$ в кристаллах точечной группы симметрии 23. Выполнен анализ изменения дисперсионных характеристик (коэффициентов управляемости, фазовой скорости, коэффициентов электромеханической связи) упругой волны в пластинах кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ при различных вариантах приложения внешнего электрического поля к пьезопластине. Отмечены направления распространения упругой волны, в которых значения коэффициента управляемости фазовых скоростей достигают экстремальных значений, а также представлена оценка возможности создания управляемой линии задержки. Например, на основе приведенных данных можно оптимальным образом выбрать направление распространения упругой волны в пластине кристалла германосилленита для создания управляемых

акустоэлектронных устройств. В частности, в направлении $[100]$ пластины кристалла германосилленита $h/\lambda=4$ для моды A_0 , где фазовая скорость волны $v=1473,9840$ м/сек и задержка сигнала в линии длиной 0,01 м составит $\Delta t=6,78433 \cdot 10^{-6}$ сек, при приложении электрического поля вдоль нормали к свободной поверхности в $[001]$ возможно изменение Δt в интервале $\pm 8,04190 \cdot 10^{-10}$ сек. при $\bar{E}=10^{-7}$ В/м, т.к. $\alpha_v=-1,18522 \cdot 10^{-11}$ м/В. Для моды SH_0 возможно изменение $\Delta t=5,9947710^{-6}$ в интервале $\pm 5,62830 \cdot 10^{-10}$ сек., т.к. $v=1668,1220$ м/сек и $\alpha_v=-9,38780 \cdot 10^{-12}$ м/В, однако для моды SH_1 , у которой $v=3054,0870$ м/сек, $\alpha_v=-8,46965 \cdot 10^{-11}$ м/В и $\Delta t=3,24657 \cdot 10^{-6}$ сек возможно изменение Δt в интервале $\pm 2,75206 \cdot 10^{-9}$ сек.

Выполнен анализ влияния внешнего электрического поля на взаимодействие (гибридизацию) мод акустической волны в пластине пьезокристалла. Продемонстрировано, что характер гибридизации акустической волны может проявляться и как снятие вырождения фазовых скоростей мод упругой волны, так и в области пространственно-временного синхронизма без непосредственного контакта фазовых скоростей акустических мод. Например эффект гибридизации между модами S_0 и SH_1 в пластине лангасита в Y-срезе проявляется при значениях $h \times f$ (толщина $\times$ частота) от 2000 м/с. На рисунке 4 указан диапазон направлений распространения упругой волны, в котором возникает эффект гибридизации между модами S_0 и SH_1 упругой волны. Чистые моды SH -волны и волн Лэмба не взаимодействуют при распространении, например, в направлении $[100]$, т.к. имеют взаимно ортогональные поляризации. Однако в произвольном направлении распространения моды упругой волны Лэмба становятся обобщенными и в некоторых областях перестают иметь взаимно ортогональные поляризации, что приводит к обмену энергией между модами упругой волны, и колебания одной моды возбуждают колебания другой. При этом происходит трансформация типа моды упругой волны в точке гибридизации, которая обозначена вертикальной штриховой линией. Значения отношений нормализованных компонент механического смещения мод S_0 и SH_1 до и после точки гибридизации приведены на рисунке 4,б. Очевидно, что при переходе через область гибридизации от $\varphi=50,7^\circ$ до $\varphi=53,6^\circ$ (заштрихованная область на рисунке 4,б) происходит трансформация типа волны. Например, до данной области преобладающим является отношение U_2/U_1 , но далее преобладающим становится U_3/U_1 (точечная линия на рисунке 4,б). Следует отметить, что непосредственно в области гибридизации определить тип волн связанных мод затруднительно. Коэффициенты гибридизации M [6] для мод упругой волны S_0 и SH_1 при $h \times f=2500$ м/с показаны на рисунке 4. Следует отметить, что в этом случае «изменение» поляризации, т.е. изменение типа моды, происходит без равенства фазовых скоростей в направлении распространения

акустической волны. Приложение постоянного электрического поля вдоль направления распространения упругой волны $\vec{E} \parallel X_1$ или ортогонально свободной поверхности $\vec{E} \parallel X_3$, уменьшает значение коэффициента гибридизации M . Однако, приложение постоянного электрического поля вдоль $\vec{E} \parallel X_2$, т.е. ортогонально сагиттальной плоскости, напротив, значительно увеличивает значения коэффициента M .

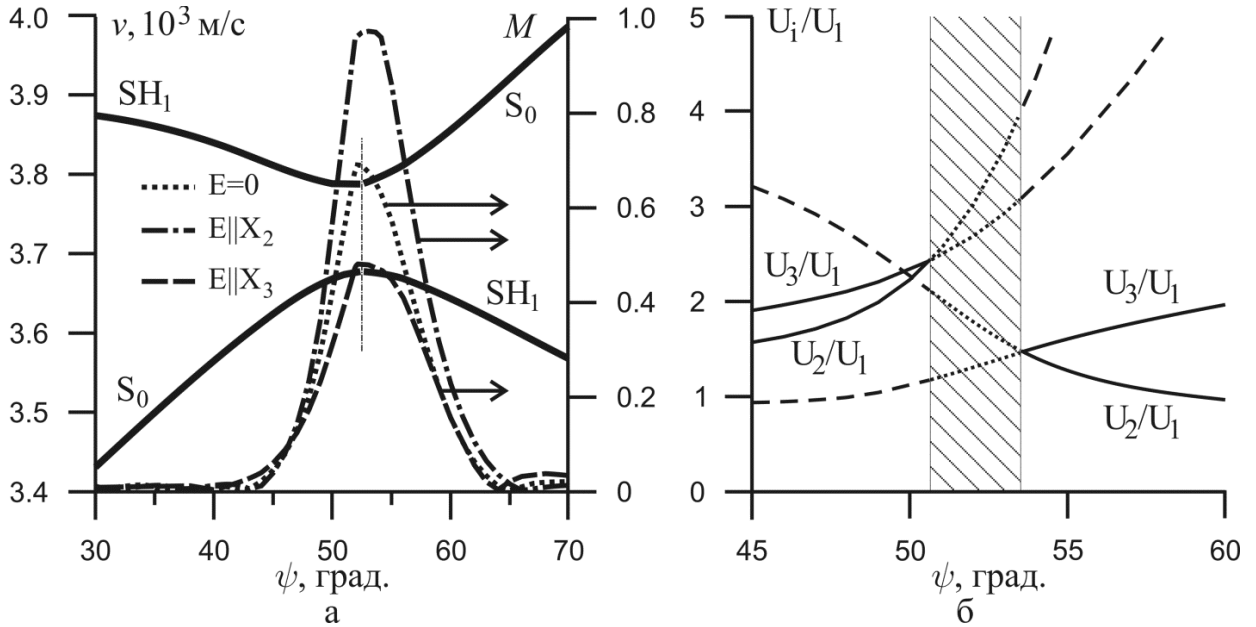


Рисунок 4 - а) Фазовые скорости и коэффициенты гибридизации для мод S_0 и SH_1 $h \times f = 2500$ м/с в пластине кристалла лангасита в Y-срезе; б) отношения нормализованных компонент вектора смещения гибридизирующих мод упругой волны

Для пластин кристалла лангасита выполнен анализ изменения характеристик акустической волны в плоскостях (001) Z-срез, (100) X-срез и (010) Y-срез, а также более сложных вариантов, таких как осей були и осей цилиндра (повернутые Y, Z- срезы), которые наиболее популярны для использования в устройствах акустоэлектроники. Температурные коэффициенты задержки в диапазоне температур 0-40°C определяются как:

$$TCD = \alpha'_{11} - \frac{1}{40} \frac{v(40^\circ) - v(0^\circ)}{v(20^\circ)} = \alpha'_{11} - TCv = -TCF. \quad (20)$$

Величина α'_{11} представляет собой эффективный коэффициент линейного теплового расширения вдоль направления распространения волны, TCv – температурный коэффициент фазовой скорости, TCF – температурный коэффициент частоты линии задержки, включенной в цепь обратной связи генератора. Температурный диапазон избран исходя из практических соображений и коррелирует с данными по фазовым скоростям при различных температурах и, соответственно, температурными зависимостями упругих постоянных и плотности кристалла LGS.

Отмечены направления распространения упругой волны с нулевыми значениями коэффициентов температурной задержки и отличными от нуля значениями коэффициентов электромеханической связи. Представлена оценка возможности термокомпенсации изменения фазовой скорости (частоты сигнала) приложением внешнего электрического поля к пластине кристалла. Например, для моды SH_0 при $h \times f = 500$ м/с максимальное значение $K^2 = 2,5\%$ найдено в направлении $(0^\circ, 0^\circ, 30^\circ)$, но $TCD = -5,41 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ имеет достаточно большую величину. Рассчитать величину электрического поля, которое компенсирует температурный скачок фазовой скорости, можно по формуле $\Delta v/v(0) = TCv \cdot \Delta T - \alpha_v \cdot \Delta \bar{E} = 0$. Таким образом, чтобы «создать» термостабильное направление, необходимо приложить электрическое поле $\bar{E} = -6,37 \times 10^4$ В/м вдоль оси X_2 или $\bar{E} = -4,67 \times 10^7$ В/м вдоль оси X_3 , учитывая соответствующие значения $\alpha_v = 9,16 \times 10^{-11}$ и $-1,26 \times 10^{-13}$ м/В, соответственно. В частности, наиболее перспективные направления распространения упругой волны в Z и Y срезах приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты для Z- и Y- срезов и направлений распространения упругих волн в пластине кристалла лангасита

Срез	Угол ψ , град.	Мода	Фазовая скорость, м/с	$h \times f$, м/с	K^2 , %	TCD, 10^{-6} K^{-1}	$\alpha_v, 10^{-12} \text{ м/В}$		
							$\bar{E} \parallel X_1$	$\bar{E} \parallel X_2$	$\bar{E} \parallel X_3$
Z-срез	14,7	SH_0	2747,24	1500	0,46	0,034	6,0	42,5	-19,8
	30	SH_0	2622,47	500	2,48	-53,9	-0,1	91,6	-0,2
	24	A_0	2420,762	1500	0,17	-4,2	29,8	-36,1	19,7
Y-срез	39,0	S_0	4759,10	1500	0,23	0,001	-25,8	-20,0	35,8
	46,8	A_0	1787,10	500	1,39	-0,018	3,2	0,8	26,7
	90,0	SH_0	2920,76	500	1,61	1,514	-0,1	-30,8	0,9

В пятой главе рассмотрено распространение упругой волны в слоистой пьезоэлектрической структуре, подвергнутой воздействию внешнего электрического поля. Распространение акустических волн в пьезоэлектрической слоистой структуре, подвергнутой внешнему статическому воздействию электрического поля $\bar{E}$, должно удовлетворять граничным условиям: равенство нулю нормальных компонент тензора напряжений на границах раздела «кристалл-вакуум»; непрерывность касательных компонент к поверхности раздела вектора напряженности электрического поля обеспечивается условием непрерывности электрического потенциала ϕ ; условием непрерывности нормальных компонент вектора индукции, а также непрерывность

нормальных компонент тензоров напряжений, векторов смещения и электрической индукции и потенциала на границе раздела «слой – подложка»:

$$\begin{aligned}
 \tau_{3A}^{(L)} &= 0 \Big|_{x_3=h}, \\
 D_3^{(L)} &= D^{(vac)} \Big|_{x_3=h}, \quad \varphi^{(L)} = \varphi^{(vac)} \Big|_{x_3=h}, \\
 U_A^{(S)} &= U_A^{(L)} \Big|_{x_3=0}, \quad \varphi^{(S)} = \varphi^{(L)} \Big|_{x_3=0}, \\
 \tau_{3A}^{(S)} &= \tau_{3A}^{(L)} \Big|_{x_3=0}, \\
 D_3^{(S)} &= D_3^{(L)} \Big|_{x_3=0}.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Здесь индексы L и S обозначают соотношения, относящиеся к слою и подложке, соответственно.

Получены дисперсионные уравнения для мод Рэлея и Лява упругой волны в слоистой структуре «пьезоэлектрик в направлении [100] плоскости (001) группы симметрии 23 – плавленый кварц» при воздействии внешнего электрического поля. Представлен анализ дисперсионной зависимости фазовых скоростей, угла потока энергии, коэффициентов электромеханической связи при различных вариантах приложения внешнего электрического поля в слоистых пьезоструктурах « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленый кварц» и « $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленый кварц». Выполнен анализ взаимодействия (гибридизации) мод акустической волны в пьезокристаллической структуре. Сделаны оценки величины гибридизации акустических мод с помощью анализа соответствующих дисперсионных зависимостей в области их взаимодействия при воздействии внешнего электрического поля на слоистую структуру. Отмечены наиболее перспективные срезы и направления распространения акустической волны для создания акустоэлектронных устройств, сочетающие существенное значение КЭМС, малую величину PFA и значимые величины коэффициентов α_v . Например, такими модами являются мода R_0 в структуре «(001) $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленый кварц» при $h \times f = 1000$ м/с и $\psi = 45^\circ$ или мода L_0 в направлении [010] в структуре «(001) $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленый кварц» при $h \times f = 1000$ м/с и $\psi = 0^\circ$.

На примере структуры « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленый кварц» исследована трансформация сдвиговой ОАВ в недисперсионную поверхностную моду Анисимкина-мл. (Anisimkin Jr. mode (AN)) [7] вследствие воздействия внешнего электрического поля на структуру. В кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ при распространении ОАВ вдоль направления [100] влияние внешнего электрического поля, приложенного вдоль [010], на фазовую скорость сдвиговых волн крайне мало: $\alpha_v = 7 \cdot 10^{-13}$ м/В и $\alpha_v = -5,7 \cdot 10^{-13}$ м/В для быстрой и медленной сдвиговых ОАВ. Однако, в слоистой пьезоэлектрической структуре «BGO/плавленый кварц» при приложении внешнего электрического поля вдоль

направления $[010]$ медленная сдвиговая волна (QSS), которая в данном случае является *SH*-волной, трансформируется в волну поверхностного типа с значением $\alpha_v = 2,4 \cdot 10^{-11}$ м/В. В данном случае у моды волны *QSH*, которая является недисперсионной, поляризация в слое постоянна – $U_2 \approx \text{constant}$ ($U_2 \gg U_1, U_3$) и волна быстро затухает в подложке. Таким образом, данную моду можно классифицировать как один из вариантов моды волны Анисимкина-мл.

На примере слоистой структуры «плавленный кварц/ LiNbO_3 » продемонстрировано, что можно подобрать параметры изотропной среды таким образом, что приложением внешнего электрического поля к слоистой структуре разрешать или запрещать распространение упругой волны. В частности, в направлении ориентации LiNbO_3 (90° , -90° , $25,1^\circ$) фазовая скорость медленной сдвиговой волны QSS OAB равна $v_{QSS} = 3758,78$ м/с, но фазовая скорость сдвиговой объемной волны SS в плавленом кварце равна $v_{SS} = 3759,84$ м/с. Таким образом, фазовая скорость сдвиговой OAB больше сдвиговой в подложке $v_{SS} < v_{QSS}$, вследствие чего существование упругих волн в слоистой структуре невозможно, кроме нулевой моды рэлеевской волны в данном случае. При приложении внешнего электрического поля вдоль направления распространения упругой волны коэффициент $\alpha_v = 7,12 \cdot 10^{-11}$ м/В для QSS LiNbO_3 и фазовая скорость медленной сдвиговой волны QSS OAB будет равна $v_{QSS} = 3796,3$ м/с при $E = 10^8$ В/м, т.е. выполняется уже условие $v_{SS} > v_{QSS}$. Следовательно, становится возможным существование как мод волны Лява (*SH*-моды), так и мод более высокого порядка рэлеевского типа (волны Сезава). Таким образом воздействием внешним электрическим полем и соответствующим подбором материалов слоя и подложки можно управлять распространением моды упругой волны в слоистой структуре по принципу «вкл/выкл».

В шестой главе рассмотрено распространение упругой волны в слоистой пьезоэлектрической структуре, подвергнутой воздействию внешнего однородного механического давления. Получены основные уравнения и граничные условия, описывающие распространение акустических волн в пьезоэлектрических слоистых структурах в условиях действия однородного механического давления. Детально проанализирован дисперсионный характер акустических мод в пьезоэлектрических слоистых структурах « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленный кварц», « $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленный кварц», «плавленный кварц/ LiNbO_3 » и « AlN /алмаз» вследствие изменения эффективной симметрии кристаллов под воздействием внешнего механического напряжения. В частности, в слоистой структуре « $[010](001)\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленный кварц» при приложении одноосного механического напряжения вдоль направления распространения упругой волны, исходная симметрия плавленного кварца, который представляет собой изотропную

среду, понижается до гексагональной группы симметрии $\infty/m\bar{m}$ с выделенным направлением вдоль приложения механического давления и индiciрованием новых эффективных упругих модулей. Однако согласно принципу симметрии Кюри, приложение одноосного механического напряжения не изменяет исходную симметрию кристалла LGS. Вследствие этого, происходит только модификация численных значений материальных тензоров существующих материальных констант кристалла $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$. Рассчитаны дисперсионные зависимости фазовых скоростей, КЭМС, коэффициентов управляемости как функций от параметра $h \times f$.

На примере слоистой структуры «AlN/алмаз» и «ZnO/Si(001)» продемонстрировано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. На рисунке 5 изображены дисперсионные зависимости коэффициентов управляемости α_v мод упругой волны в слоистой структуре «ZnO/Si(001)» при приложении внешнего механического напряжения вдоль нормали к свободной поверхности. Точками на графиках отмечены экспериментальные точки (кружком – мода R_0 ; крест – мода R_1), значения которых отложены на правой шкале $\frac{\Delta f}{f}$ из работы [8]. Разница в значениях расчетных коэффициентов α_v и в значениях экспериментальных точек обусловлена тем, что экспериментальные точки приведены в единицах $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{v} - \frac{\Delta L}{L}$, где $\Delta L/L$ – относительное изменение длины звукопровода.

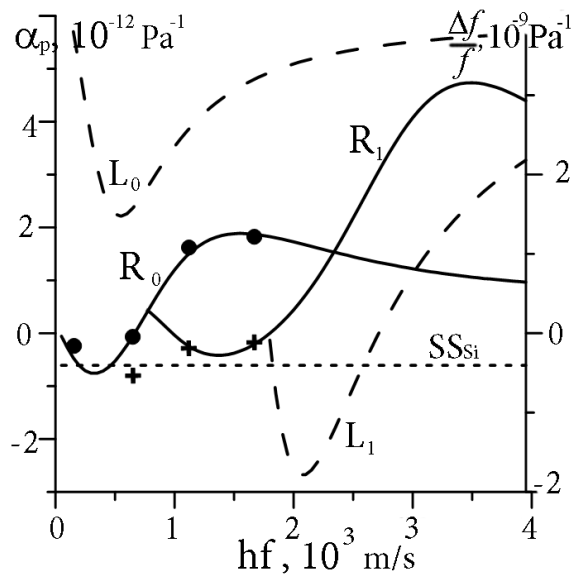


Рисунок 5 - Коэффициенты управляемости α_v при $P||X_3$ в слоистой структуре «ZnO/Si(001)»: SS_{Si} – объемная сдвиговая волна в подложке; R_i и L_i – моды волны Рэлея и Лява. Точки – экспериментальные значения из [8]

Выполнена оценка вклада нелинейных материальных тензоров кристалла третьего порядка и статической деформации в слое (физическая и геометрическая нелинейность) в изменение характеристик упругой волны, возникающее вследствие воздействия внешнего механического напряжения на слоистую пьезоструктуру. Отмечено, что учет нелинейных материальных тензоров увеличивает значения коэффициентов управляемости фазовых скоростей, как правило, более чем на порядок даже в направлениях, где влияние механического напряжения на ОАВ минимально. Необходимо отметить, что в рассмотренных структурах в основном влияние статического напряжения и учет материальных тензоров кристалла третьего порядка действует на значение фазовой скорости разнонаправлено. Учет нелинейных материальных тензоров при расчете может как практически полностью компенсировать геометрическую нелинейность образца, так и увеличивать изменение фазовой скорости упругой волны при воздействии внешнего механического напряжения. Таким образом, вопрос об учете материальных тензоров кристалла слоя третьего порядка в расчетах характеристик упругой волны при воздействии внешнего механического давления необходимо рассматривать, исходя из конкретных условий эксперимента. Например, на рисунке 6 представлены дисперсионные зависимости фазовых скоростей коэффициентов α_v волн Рэлея в структуре «[010](001)LGS/плавленый кварц». Приведены коэффициенты управляемости α_v мод волны Рэлея при $P||X_1$ и $P||X_2$. Сплошными линиями показаны значения α_v при приложении одноосного давления к структуре с учетом полного набора материальных тензоров 3-го порядка (Full Set of Nonlinearities) как для слоя, так и для подложки. Штриховыми линиями показаны значения коэффициентов управляемости, рассчитанные с учетом только статической деформации слоя (Geometric Nonlinearity of the Layer) без учета нелинейных тензоров материала слоя. Но в последнем случае воздействие одноосного механического давления на подложку учитывалось в полном объеме с учетом нелинейных материальных постоянных кристаллической среды. Характер дисперсионных зависимостей коэффициентов управляемости как для мод волны Рэлея, так и для мод волны Лява при приложении механического давления вдоль направления распространения волны $P||X_1$ качественно одинаков для обоих вариантов расчета (рисунок 6, а,б). Значения коэффициентов управляемости рэлеевских мод упругой волны при варианте GNL расчета меньше на два порядка и стремятся к значению $\alpha_v = -1,05 \cdot 10^{-13} \text{ Па}^{-1}$ SAW^{GNL}_{LGS} волны. При приложении механического давления вдоль $P||X_2$, т.е. ортогонально сагитальной плоскости, при варианте GNL расчета для рэлеевских мод упругой волны вследствие сильной геометрической нелинейности, характер дисперсионных зависимостей коэффициентов управляемости меняется. Значения коэффициентов

управляемости асимптотически приближаются к значению $\alpha_v = -2,22 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ для $\text{SAW}_{\text{LGS}}^{\text{GNL}}$ волны, т.е. если учет статической деформации в данном случае приводит к «уменьшению» значения фазовой скорости упругой волны, то учет всех нелинейных материальных констант кристалла приводит к «увеличению» ($\alpha_v = 1,14 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$).

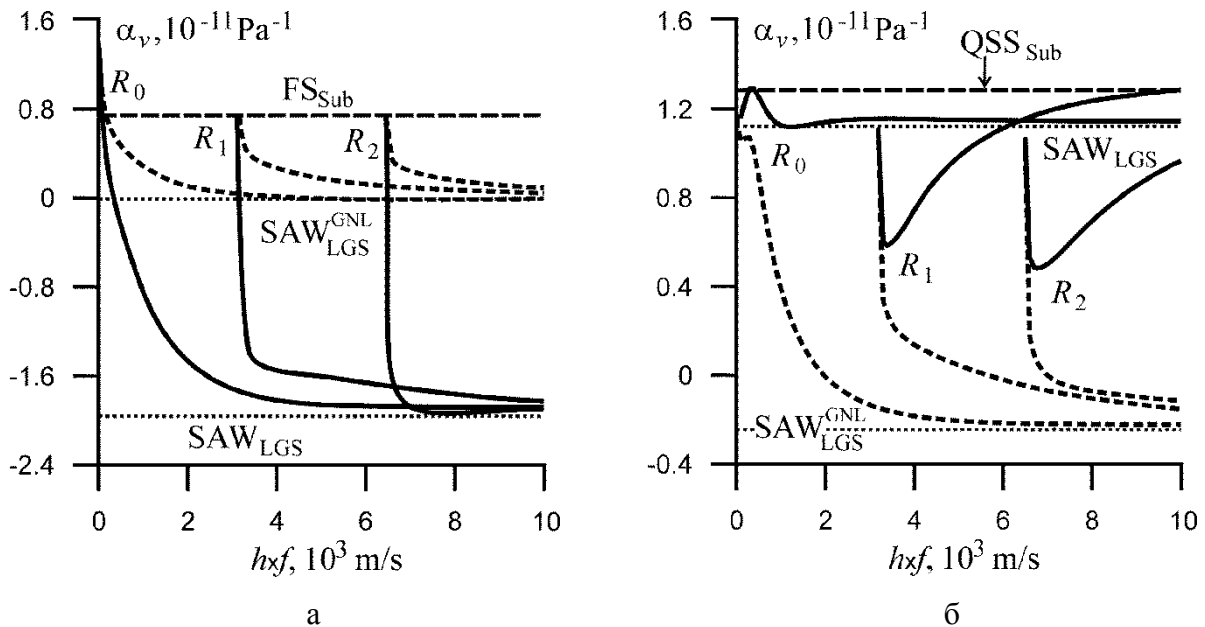


Рисунок 6 – Дисперсия коэффициентов управляемости α_v акустических волн в слоистой структуре «[010](001) LGS/плавленный кварц» при вариантах расчета FSN и GNL: а) коэффициенты управляемости α_v мод волны Рэлея при $P||X_1$; б) α_v мод волны Рэлея при $P||X_2$. QSS_{Sub} , QFS_{Sub} – объемные медленные и быстрые квазипоперечные волны в подложке. SAW_{LGS} . R_i – моды волны Рэлея

На примере слоистой структуры «LGS/плавленный кварц» продемонстрирована трансформация объемных акустических волн кристалла лангасита в недисперсионные упругие волны поверхностного типа «Анисимкина-мл.» (AN-QSH и AN-QSV), причем даже в линейном случае, т.е. без учета внешнего механического воздействия. Необходимо отметить, что подобная трансформация в слоистой структуре «LGS/плавленный кварц» происходит во всех рассмотренных примерах. Отмечен эффект взаимодействия (гибридизации) между волной AN-QSH и рэлеевской модой R_1 , что может являться объяснением утечки энергии в резонаторах, созданных на подобных слоистых структурах. Особенностью подобного взаимодействия является также тот факт, что смена типа колебаний в данном случае происходит только в области взаимодействия упругих волн.

В седьмой главе представлены основные принципы, на основе которых был создан программный комплекс для расчета характеристик упругих волн в пьезокристаллах и слоистых структурах, подвергнутых внешним статическим воздействиям. Для повышения точности расчета характеристик поверхностных акустических волн предложен алгоритм

нормировки уравнений состояния (2) пьезоэлектрической среды относительно гипотетической «идеализированной» пьезоэлектрической среды с коэффициентом электромеханической связи, равном единице:

$$K^2 = \frac{C_a \varepsilon_0}{e_a} = 1,$$

где $e_a = 1$ Кл/м² – пьезокоэффициент, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость, $C_a = 1/8,85 \cdot 10^{-12}$ Н/м². Следует отметить, что вычислительный «эксперимент» показал – без использования нормировки точность определения фазовой скорости ПАВ составляет 4-5 знаков после запятой, с использованием нормировки 15-18 знаков после запятой.

Для определения всех возможных точек минимумов функции определителя граничных условий ПАВ был использован модифицированный метод ломаных, с помощью которого весь допустимый интервал значений фазовых скоростей ПАВ разбивается на множество малых интервалов. Далее определяются интервалы, в которых возможен минимум функции определителя. Для расчета характеристик упругой волны в пластине или слоистой структуры был реализован алгоритм поиска минимума целевой функции (определятеля граничных условий) на дискретной регулярной сетке по значениям фазовых скоростей. Шаг дискретизации регулируется в зависимости от расположения локальных минимумов с возможностью управления в диалоговом режиме. Недостатком подобных методов является большой объем вычислений, но гарантировано нахождение всех решений (мод упругой волны).

На основе предложенного алгоритма вычислений характеристик поверхностной акустической волны создан программный комплекс, позволяющий рассчитать характеристики упругой волны в монокристалле, в пластине пьезоэлектрика и многослойной пьезоэлектрической системе, как в линейном случае для кристаллов произвольной группы симметрии, так и под воздействием однородного внешнего электрического поля и одноосного механического давления.

Основные результаты и выводы

1. На основе теории термодинамики конечно-деформированной пьезоэлектрической среды впервые получены энергетические соотношения, описывающие распространение объемных и поверхностных акустических волн в пьезокристаллах, подвергнутых влиянию внешних статических воздействий. Это позволило выполнить анализ влияния внешнего однородного электрического поля и одноосного механического давления на свойства и типы упругих волн в пьезокристаллах.

Была продемонстрирована трансформация одного типа упругих волн в другой при статической деформации пьезоэлектрической среды, в частности, трансформация особой объемной волны в волну Блюстейна-Гуляева при воздействии внешнего электрического поля на кристалл.

2. Выполнен анализ анизотропии характеристик ОАВ и ПАВ: коэффициентов управляемости фазовых скоростей, векторов поляризации упругой волны, групповых скоростей и углов отклонения потока энергии от волновой нормали при различных вариантах приложения внешнего воздействия (электрического поля и механического давления) в кристаллах силикосилленита, ниобата лития, лангасита и алмаза. Для идентичных экспериментальных и расчетных вариантов распространения упругой волны получено хорошее совпадение результатов при воздействии как электрического поля, так и одноосного механического напряжения.

3. Продemonстрировано влияние статических внешних воздействий на акустическую ось кристалла. Показано, что в окрестности точки вырождения (акустическая ось) изменения собственных значений (фазовой скорости) ОАВ под внешними статическими воздействиями описываются с помощью разложения в ряд Пуассона по дробно-степенным значениям от величины воздействия. Продemonстрирована топология изменения поляризационных полей сдвиговых волн на примере кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ в окрестности точки вырождения при статических внешних воздействиях на кристалл.

4. Выполнен анализ области применения теории термодинамики конечно-деформированной пьезоэлектрической среды для расчета изменения характеристик упругой волны в пьезокристаллах, подвергнутых воздействию статических внешних воздействий – электрического поля и механического давления. Показано, что в общем случае линейная зависимость характеристик упругой волны от величины внешнего воздействия практически сохраняется до значений $\bar{E} \approx 10^8$ В/м и $\tau \approx 5 \cdot 10^8$ Па. Однако ограничением применяемой теории линейного характера изменения свойств упругой волны может быть как возникающая геометрическая нелинейность, связанная со статической деформацией кристалла, так и сочетание пьезоэлектрических и электрострикционных свойств пьезокристалла.

5. Впервые исследовано влияние внешних статических воздействий на отражение и преломление ОАВ от границы раздела «кристалл-вакуум» и «кристалл-кристалл» при различных вариантах типа падающей волны. Вследствие изменения эффективной симметрии кристалла при приложении внешних статических воздействий (электрического поля, механического напряжения), особенно в области

акустических осей, происходит изменение поляризации упругой волны, что приводит к трансформации типа отраженных и преломленных ОАВ. Показано, что такие изменения подчиняются принципу симметрии Кюри.

6. Представлены основные уравнения и граничные условия, описывающие распространение упругой волны в пластине пьезоэлектрического кристалла, подвергнутого воздействию внешнего электрического поля. Получены дисперсионные соотношения для волны Лэмба и *SH*-волны, распространяющихся вдоль направления $[100]$ в кристаллах точечной группы симметрии 23. Выполнен детальный анализ изменения дисперсионных характеристик упругой волны в пластинах кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ при различных вариантах приложения внешнего электрического поля к пьезопластине. Указаны направления с максимальными и минимальными проявлениями влияния внешнего электрического поля на характеристики упругой волны. Проанализированы закономерности управления характеристиками упругой волны внешним воздействием. В частности, выполнена оценка создания управляемой линии задержки сигнала ($\Delta t = \pm 3,85$ нсек при $\Delta \bar{E} = 1 \cdot 10^7$ В/м) на симметричной моде S_0 волны Лэмба в X-срезе кристалла лангасита.

7. Впервые выполнен анализ влияния внешнего электрического поля на взаимодействие (гибридизацию) мод акустической волны в пластине пьезокристалла. Влияние внешнего электрического поля может заключаться как в увеличении, так и уменьшении значения коэффициента гибридизации. Продемонстрирован характер смены типа взаимодействующих мод в области гибридизации при воздействии внешнего электрического поля.

8. Выполнен расчет и поиск срезов и направлений в пластине кристалла лангасита, в которых моды волн Лэмба и *SH*-волны обладают термостабильностью значений фазовых скоростей и задержки с величиной КЭМС, большей, чем у кристалла кварца. Отмечены наиболее перспективные направления распространения упругой волны с термостабильными свойствами в пластине кристалла лангасита. Выполнен анализ возможности компенсации температурных флуктуаций фазовых скоростей упругой волны приложением внешнего электрического поля.

9. Получены основные уравнения и граничные условия, описывающие распространение упругой волны в слоистой пьезоэлектрической структуре, подвергнутой внешним статическим воздействиям однородного электрического поля, одноосного механического давления.

10. Выполнен анализ дисперсионной зависимости фазовых скоростей, угла потока энергии, КЭМС, вследствие изменения эффективной симметрии кристаллов при

различных вариантах приложения внешнего электрического поля либо одноосного механического давления в пьезоэлектрических слоистых структурах « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленый кварц», « $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленый кварц», «плавленый кварц/ LiNbO_3 » и « AlN /алмаз». Для совпадающих экспериментальных и расчетных вариантов распространения упругой волны получено хорошее совпадение результатов.

11. Отмечены наиболее перспективные срезы и направления распространения акустической волны для создания акустоэлектронных устройств, сочетающие существенное значение КЭМС, малую величину отклонения потока энергии и значимые величины коэффициентов управляемости α_v . Продемонстрирована принципиальная возможность управлять распространением моды упругой волны в слоистой структуре по принципу «вкл/выкл» приложением внешнего электрического поля к структуре.

12. Продемонстрировано, что воздействие внешнего электрического поля вследствие изменения эффективной симметрии кристалла может приводить к трансформации ОАВ в упругую волну поверхностного типа, например, в структуре « $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ /плавленый кварц» происходит трансформация сдвиговой объемной волны в недисперсионную поверхностную моду «Анисимкина-мл.». Аналогичные трансформации типа упругой волны отмечены и в структурах « $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ /плавленый кварц» при воздействии одноосного механического давления. Отмечен эффект взаимодействия (гибридизации) между волной «Анисимкина-мл.» и рэлеевской модой упругой волны, что, в частности, может являться объяснением утечки энергии в резонаторах, созданных на подобных слоистых структурах.

13. Выполнен анализ вклада нелинейных материальных тензоров кристалла третьего порядка и статической деформации в слое в изменение характеристик упругой волны вследствие внешнего механического напряжения. Отмечено, что учет материальных тензоров кристалла третьего порядка увеличивает значения коэффициентов управляемости фазовых скоростей, как правило, более чем на порядок даже в направлениях, где влияние механического напряжения на изменение характеристик ОАВ минимально.

14. Создан программный комплекс, позволяющий рассчитать характеристики упругой волны в монокристалле, в пластине пьезоэлектрика и многослойной пьезоэлектрической системе как в «линейном» кристалле, так и в подвергнутом внешнему статическому воздействию (электрического поля, одноосного механического давления). Разработанный метод решения задач кристаллоакустики может быть распространен на другие типы внешних воздействий или их комбинации при условии

точного учета соответствующих граничных условий и материальных констант, вследствие чего представляет интерес для проектирования устройств акустоэлектроники.

Основные результаты работы опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Зайцева М. П., Шабанова Л. А., Кидяров Б. И., Кокорин Ю. И., Бурков С. И. Акустические свойства формиата лития // Кристаллография. – 1983. – Т. 28. – № 4. – С. 741-744.
2. Сорокин Б. П., Зайцева М. П., Кокорин Ю. И., Бурков С. И., Соболев Б. В., Четвергов Н. А. Анизотропия управления скоростью объемных акустических волн электрическим полем в пьезоэлектриках со структурой силленита // Акустический журнал. – 1986. – Т. 32. – № 5. – С. 664-666.
3. Кокорин Ю. И., Сорокин Б. П., Бурков С. И., Александров К. С. Изменения акустических свойств кубического пьезоэлектрического кристалла постоянным электрическим полем // Кристаллография. – 1986. – Т. 31. – № 4. – С. 706-709.
4. Александров К. С., Бурков С. И., Замков А. В., Холов А., Хафизов С. Х., Шабанова Л. А., Клевцов Л. В. Акустооптические и упругие свойства кристаллов $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ и $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ // ФТТ. – 1988. – Т. 30. – № 2. – С. 609-612.
5. Александров К. С., Бурков С. И., Сорокин Б. П., Шабанова Л. А. Анизотропия акустических характеристик монокристаллов PbCl_2 и PbBr_2 // ФТТ. – 1988. – Т. 30. – № 1. – С. 227-230.
6. Сорокин Б. П., Бурков С. И., Александров К. С. Поток энергии объемной акустической волны в пьезоэлектрических кристаллах при воздействии внешнего электрического поля // ФТТ. – 1989. – Т. 31. – № 10. – С. 193-198.
7. Сорокин Б. П., Сорокина Т. П., Бурков С. И. Упругие свойства и акустические параметры скандийзамещенных гексаферритов // ФТТ. – 1989. – Т. 31. – № 12. – С. 156-158.
8. Александров К. С., Бурков С. И., Сорокин Б. П. Влияние внешнего однородного электрического поля на свойства волн Рэлея в пьезоэлектрических кристаллах // ФТТ. – 1990. – Т. 32. – № 1. – С. 186-192.
9. Burkov S. I., Sorokin B. P., Karpovich A. A., Aleksandrov K. S. The Influence Of Static Homogeneous Fields on The Properties of SAW in Piezoelectric // Ferroelectrics Letters. – 1992. – V. 14. – № 5/6. – P. 99-113.
10. Александров К. С., Сорокин Б. П., Турчин П. П., Бурков С. И. Нелинейные электромеханические свойства и распространение акустических волн под действием

внешних статических полей в пьезоэлектрике $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ // Известия РАН. сер. физ. – 1996. – Т. 60. – № 10. – С. 103-105.

11. Александров К. С., Сорокин Б. П., Глушков Д. А., Безматерных Л. Н., Бурков С. И., Белущенко С. В. Электромеханические свойства и анизотропия распространения акустических волн в метаборате меди CuB_2O_4 // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – № 1. – С. 42-45.

12. Бурков С. И., Сорокин Б. П., Глушков Д. А., Александров К. С. Теория и компьютерное моделирование процессов отражения и преломления объемных акустических волн в пьезоэлектриках при воздействии внешнего электрического поля // Кристаллография. – 2005. – Т. 50. – № 6. – С. 1053-1060.

13. Бурков С. И., Сорокин Б. П., Александров К. С., Карпович А. А. Отражение и преломление объемных акустических волн в пьезоэлектриках при воздействии одноосного напряжения // Акустический Журнал. – 2009. – Т. 55. – № 2. – С. 180-187.

14. Бурков С. И., Золотова О. П., Сорокин Б. П., Александров К. С. Влияние внешнего электрического поля на характеристики волны Лэмба в пьезоэлектрической пластине // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56. – № 5. – С. 606-612.

15. Бурков С. И., Золотова О. П., Сорокин Б. П. Распространение волн Лэмба и SH -волн в пластине пьезоэлектрического кубического кристалла // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2010. – Т. 3. – № 2. – С. 185-204.

16. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P., Aleksandrov K. S. Anisotropy of DC Electric Field Influence on Acoustic Wave Propagation in Piezoelectric Plate // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2011. – Т. 4. – № 3. – С. 282-291.

17. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Influence of The External Electric Field on Propagation of The Lamb Waves in The Piezoelectric Plates // IEEE Trans. UFFC. – 2011. – V. 58. – no. 1. – P. 239-243.

18. Бурков С. И., Золотова О. П., Сорокин Б. П., Турчин П. П. Расчет термостабильных направлений и влияния внешнего электрического поля на распространение волн Лэмба и SH волн в пластине кристалла лангасита // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 6. – С. 692-700.

19. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Anisotropy of Lamb and SH Waves Propagation in Langasite Single Crystal Plates Under The Influence of DC Electric Field // Ultrasonics. – 2012. – V. 52. – № 3. – P. 345-350.

20. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Calculation of the Dispersive Characteristics of Acoustic Waves in Piezoelectric Layered Structures Under the Effect of DC Electric Field // IEEE Trans. Ultras. Ferroel. Freq. Cont. – 2012. – V. 59. – no. 10. – P. 2331-2337.
21. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Influence of Bias Electric Field on Elastic Waves Propagation in Piezoelectric Layered Structures // Ultrasonics. – 2013. – V. 53. – no. 6. – P. 1059-1064.
22. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Kuznetsov M. S., Telichko A. V., Burkov S. I. Experimental Investigation of the Linear and Nonlinear Elastic Properties of Synthetic Diamond Single Crystal // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 120-126.
23. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. The Influence of Uniform Pressure on Propagation of Acoustic Waves in Piezoelectric Layered Structures // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2014. – Т. 7. – № 1. – С. 10-21.
24. Burkov S. I., Zolotova O. P., Turchin P. P. Influence of Uniaxial Pressure on Elastic Waves Propagation in Piezoelectric Layered Structures «Y-cut langasite/fused silica» // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 7-21.
25. Сорокин Б. П., Квашнин Г. М., Теличко А. В., Гордеев Г. И., Бурков С. И., Бланк В. Д. Исследования многочастотных СВЧ акустических резонаторов на основе слоистой пьезоэлектрической структуры «Me1/AlN/Me2/(100) алмаз» // Акустический Журнал. – 2015. – Т. 61. – № 4. – С. 464-476.
26. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P., Turchin P. P. The Analysis of The Effect of Homogeneous Mechanical Stress on The Acoustic Wave Propagation in The «La₃Ga₅SiO₁₄/fused silica» Piezoelectric Layered Structure // Ultrasonics. – 2015. – V. 55. – no. 1. – P. 104-112.

В монографиях, материалах конференций и других изданиях:

1. Александров К. С., Сорокин Б. П., Бурков С. И. Эффективные пьезоэлектрические кристаллы для акустоэлектроники, пьезотехники и сенсоров (т. 1). – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2007. – 501 с.
2. Александров К. С., Сорокин Б. П., Бурков С. И. Эффективные пьезоэлектрические кристаллы для акустоэлектроники, пьезотехники и сенсоров (т. 2). – Новосибирск : Изд-во СО РАН. – 2008. – 429 с.
3. Бурков С. И., Сорокин Б. П., Кокорин Ю. И., Александров К. С. Линейные и нелинейные акустические свойства кристаллов силикосилленита // Красноярск : ИФ. –

1987. – 44 с. (Препринт №438Ф АН СССР. Сиб. отд-ние, Ин-т физики им. Л.В.Киренского).

4. Александров К. С., Бурков С. И., Сорокин Б. П. Влияние постоянного электрического поля на распространение поверхностных акустических волн в пьезоэлектриках // Красноярск : ИФ. – 1988. – 46 с. (Препринт №525Ф АН СССР. Сиб. отд-ние, Ин-т физики им. Л.В. Киренского).

5. Aleksandrov K. S., Burkov S. I., Sorokin B. P. The SAW Propagation in Piezoelectric Crystals Under The Bias DC Field // Proc. of II International Symp. on Surface Waves in Solids and Layered Structures (ISSWAS'89, Extended Abstracts). – Bulgaria, Varna. – 1989. – P. 69-71.

6. Aleksandrov K. S., Burkov S. I., Sorokin B. P. The Influence of The DC Field on The Bluestein-Gulyaev SAW in Sillenite Structure Crystals // Proc. of II International Symp. on Surface Waves in Solids and Layered Structures (ISSWAS'89, Extended Abstracts). – Bulgaria, Varna. – 1989. – P. 72-74.

7. Aleksandrov K. S., Turchin P. P., Sorokin B. P., Burkov S. I., Glushkov D. A., Karpovich A. A. Effects of Static Electric Field and of Mechanic Pressure on Surface Acoustic Waves Propagation in $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ Piezoelectric Single Crystals // Proc. of 1995 IEEE Ultrasonics Symp. (Seattle, USA), NY. – 1995. – V. 1. – P. 409-412.

8. Turchin P. P., Sorokin B. P., Burkov S. I., Glushkov D. A., Aleksandrov K. S. Influence of Static Electric Field, Mechanic Pressure and Temperature on The Propagation Of Acoustic Waves in $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ Piezoelectric Single Crystals // Proc. of 1996 IEEE International Frequency Control Symp. (Honolulu, USA). – 1996. – P. 161-169.

9. Burkov S. I., Karpovich A. A., Aleksandrov K. S. Reflection and Refraction of Bulk Acoustic Waves in Piezoelectric Crystals Under The Action of Bias Electric Field and Uniaxial Pressure // Proc. of IEEE Ultrasonics Symp. (Beijing, China). – 2008. – P. 2161-2164.

10. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Influence of The External Electric Field on Propagation of Lamb Waves in Thin Piezoelectric Sheets // Proc. of IEEE Ultrasonics Symp. (Beijing, China). – 2008. – P. 1812-1814.

11. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P., Turchin P. P., Aleksandrov K. S. Calculation of Thermostable Directions and the Influence of Bias Electric Field on the Propagation of the Lamb Waves in Languasite Single Crystal Plates // Proc. IEEE Ultrason. Symp. (San Diego, California, USA, October 11-14). – 2010. – P. 1853-1856.

12. Sorokin B. P., Burkov S. I. Influence of Homogeneous Stress on BAW and SAW Propagation in Diamond Single Crystals // Proc. IEEE Ultrason. Symp. (San Diego, California, USA, October 11-14). – 2010. – P. 1242-1245.

13. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Effect of DC Electric Field on the Dispersive Characteristics of Acoustic Waves in Piezoelectric Layered Structure // Proc. IEEE Inter. Freq. Cont. Symp. & European Freq. and Time Forum (San Fransisco, California, USA, May 1-5). – 2011. – P. 117-120.
14. Сорокин Б. П., Бурков С. И. Расчет анизотропии параметров распространения ПАВ в слоистой структуре AlN/Алмаз // Конф. «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV Сессия Российского акустического общества». – Саратов, 2011. – Т. 1. – С. 263-266.
15. Бурков С. И., Золотова О. П., Сорокин Б. П. Влияние постоянного электрического поля на дисперсионные характеристики акустических волн в пьезоэлектрических слоистых структурах // Конф. «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV Сессия Российского акустического общества». – Саратов, 2011. – Т. 1. – С. 266-270.
16. Бурков С. И., Золотова О. П., Сорокин Б. П. Влияние однородного давления на дисперсионные характеристики волн Рэлея и SH-волн в пьезоэлектрических слоистых структурах // Конф. «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV Сессия Российского акустического общества». – Таганрог, 2012. – С. 298-302.
17. Бурков С. И., Сорокин Б. П. Область применения линейного приближения в теории влияния внешних статических воздействий на распространение упругих волн в пьезоэлектрических кристаллах // Конф. «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV Сессия Российского акустического общества». – Таганрог, 2012. – С. 302-306.
18. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Kuznetsov M. S., Burkov S. I. Influence of the Temperature and Uniaxial Pressure on the Elastic Properties of Synthetic Diamond Single Crystal // Proc. IEEE Inter. Ultrasonics Symp. (Dresden, Germany, October 7-10). – 2012. – P. 763-766.
19. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P., Aleksandrov K. S. Anisotropy of DC Electric Field Influence on Acoustic Wave Propagation in Piezoelectric Plate // Cornell University Library: [сайт]. [2010]. URL: <http://arxiv.org/abs/1008.2058>. (дата обращения: 20.01.2015).
20. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P., Turchin P. P. Zero and First Order Lamb and SH Waves Propagation in Langasite Single Crystal Plates under the Influence of dc Electric Field // Cornell University Library: [сайт]. [2010]. URL: <http://arxiv.org/abs/1012.0657>. (дата обращения: 20.01.2015).
21. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P., Turchin P. P., Aleksandrov K. S. Calculation of thermostable directions and the influence of bias electric field on the propagation of the Lamb and SH waves in langasite single crystal plates // Cornell University Library: [сайт]. [2012]. URL: <http://arxiv.org/abs/1011.5310>. (дата обращения: 20.01.2015).

Свидетельства:

1. Бурков С.И., Сорокин Б.П. Расчет характеристик отражения и преломления объемных акустических волн от границы раздела двух сред при воздействии однородных внешних электрических и механических полей // Свидетельство № 2009613151 от 18.06.2009.
2. Бурков С.И., Сорокин Б.П. Расчет анизотропии распространения объемных акустических волн в пьезокристаллах при воздействии однородного внешнего электрического поля // Свидетельство № 2009613152 от 18.06.2009.
3. Бурков С.И. Расчет анизотропии распространения объемных акустических волн в пьезокристаллах при воздействии одноосного механического давления // Свидетельство № 2013615038 от 27.05.2013.
4. Бурков С.И., Сорокин Б.П. Расчет анизотропии распространения поверхностных акустических волн в пьезокристаллах при воздействии однородного внешнего электрического поля // Свидетельство № 2009613150 от 18.06.2009.
5. Бурков С.И. Расчет анизотропии распространения поверхностных акустических волн в пьезокристаллах при воздействии одноосного механического давления // Свидетельство № 2013617058 от 31.07.2013.
6. Бурков С.И., Золотова О.П. Расчет дисперсионных характеристик акустических волн в пьезоэлектрических пластинах при воздействии однородного внешнего электрического поля // Свидетельство № 2012618199 от 10.09.2012.
7. Бурков С.И., Золотова О.П. Расчет дисперсионных характеристик акустических волн в слоистых пьезоструктурах при воздействии однородного внешнего электрического поля // Свидетельство № 2012618261 от 12.09.2012.
8. Бурков С.И., Сорокин Б.П. Расчет характеристик составного акустического резонатора СВЧ диапазона на объемных акустических волнах (HBAR) // Свидетельство № 2013616768 от 18.07.2013.

Список цитированной литературы

1. Zaitsev B. D, Kuznetsova I. E. Electric field influence on acoustic waves // In “Handbook of an advanced photonic and electronic materials and devices”. Ed. by H.S. Nalwa. – New York: Academic Press. – 2001. – V. 4. – Ch. 4. – P. 139-174.
2. Kosinski J. A., Pastore, Jr. R. A., Yang J., Yang X., Turner J. A. Stress-induced frequency shifts of degenerate thickness-shear modes in rotated Y-cut quartz resonators // IEEE TUFFC. – 2010. – V. 57. – no. 8. – P. 1880-1883.

3. Терстон Р. Распространение волн в жидкостях и твердых телах // Физическая акустика. – 1966. – Т. 1. – № ч А. – 592 с.
4. Tiersten H. F. Nonlinear electroelastic equations cubic in the small field variables // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1975. – V. 57. – no. 3. – P. 660-666.
5. Sinha B. K., Tanski W. J., Lukaszek T., Ballato A. Influence of biasing stresses on the propagation of surface waves // J. Appl. Phys. – 1985. – V. 57. – no. 3. – P. 767-776.
6. Кузнецова И. Е., Зайцев Б. Д., Теплых А. А., Бородин И. А. Особенности «гибридизации» акустических волн в пьезоэлектрических пластинах // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53. – № 1. – С. 73-79.
7. Anisimkin I.V. New type of an acoustic plate modes: Quasi-longitudinal normal wave // Ultrasonics. – 2004. – V. 42. – no.10. – P. 1095-1099.
8. Talbi A., Sarry F., Le Brizoual L., Elmazria O., Alnot P. Sezawa Mode SAW Pressure Sensors Based on ZnO/Si Structure // IEEE TUUFC. – 2004. – V. 51. – no.11. – P. 1421-1426.