

На правах рукописи

Золотова Ольга Павловна

Влияние внешнего электрического поля
на распространение упругих волн в пьезоэлектрических
пластинах и слоистых структурах

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2012

Работа выполнена на базовой кафедре физики конденсированного состояния вещества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,
доцент Бурков Сергей Иванович

Официальные оппоненты: Горев Михаил Васильевич,
доктор физико-математических наук,
доцент, ФГБУН «Институт физики
им. Л. В. Киренского» СО РАН,
ведущий научный сотрудник
лаборатории кристаллофизики

Забелин Алексей Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
ФГАОУ ВПО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС», доцент

Ведущая организация ФГБУН «Институт радиотехники и
электроники им. В. А. Котельникова» РАН,
Саратовский филиал, г. Саратов

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2012 г. в
_____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 при
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт
физики им. Л. В. Киренского» СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск,
Академгородок, 50, строение № 38

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Втюрин Александр Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Изучение процессов распространения акустических волн в пьезокристаллах как связанных упругих и электрических колебаний является важной задачей акустоэлектроники. В настоящее время разработано огромное количество устройств различного назначения, в основу работы которых положено явление пьезоэлектричества. Современные задачи в области разработки акустоэлектронных (АЭ) устройств требуют обращать внимание не только на улучшение рабочих характеристик, но и на миниатюризацию устройства, простоту изготовления и снижение стоимости производства. В связи с этим особое значение приобретают задачи о распространении волн в ограниченных средах (акустически тонких пластинах, толщина которых сравнима с длиной волны, и слоистых структурах на их основе).

Для расширения функциональных возможностей АЭ-устройств большой интерес вызывает возможность динамического управления свойствами акустических волн путем приложения внешних воздействий (в частности, однородного электрического поля). Необходимым условием исследования поведения волн при подобном воздействии является наличие полного набора коэффициентов нелинейных электромеханических свойств (НЭМС). Однако, вследствие сложности расчетных соотношений, аналитическое исследование возможно сделать только в высокосимметричных направлениях распространения волн.

Основные принципы распространения объемных акустических волн (ОАВ) и поверхностных акустических волн (ПАВ) в пьезоэлектрических средах к настоящему времени подробно исследованы. Однако анализ литературы показал, что характеристики акустических волн в пьезоэлектрических пластинах под действием внешнего электрического поля исследованы недостаточно. Необходимо отметить, что анизотропия пьезокристаллов, используемых в качестве звукопровода, позволяет варьировать параметры АЭ-устройств в широком диапазоне. Таким образом, исследование влияния внешнего электрического поля на характеристики акустических волн в пьезопластинах, как в отдельных направлениях распространения, так и в различных кристаллографических срезам, является актуальной задачей.

Структуры типа «слой/подложка» (металлический, диэлектрический или пьезоэлектрический слой конечной толщины, нанесенный на полубесконечную подложку с различными свойствами) играют важную роль в разработке АЭ-систем и устройств. Распространение акустических волн в слоистых структурах под действием внешнего электрического поля к настоящему времени практически не исследовано.

При изучении характеристик слоистых структур возникают такие задачи, как поиск комбинаций материалов подложки и слоя, позволяющих улучшить параметры ПАВ; а также поиск новых срезов и ориентаций

кристаллов в структурах с известными комбинациями материалов подложки и слоя. Оптимальным методом решения такого класса задач является компьютерное моделирование, позволяющее эффективно определить параметры исследуемой структуры без проведения эксперимента.

Таким образом, комплексное исследование поведения акустических волн в пьезоэлектрических пластинах и слоистых структурах на их основе, разработка корректной математической модели распространения волн как в невозмущенном состоянии, так и под влиянием внешнего электрического поля, расчет влияния внешнего электрического поля на характеристики волн являются актуальными задачами, решение которых имеет важное прикладное значение для разработки элементов АЭ-устройств.

Цели диссертационной работы:

1. Вывод аналитических соотношений, описывающих распространение акустических волн различных типов в пьезоэлектрических пластинах кристалла точечной симметрии класса 23 и слоистых структурах вида «пьезоэлектрик/изотропная среда» и «изотропная среда/пьезоэлектрик».

2. Исследование особенностей распространения волн Лэмба и поперечно-горизонтальных (SH) волн в пьезоэлектрических пластинах кристалла точечной симметрии классов 23 и 32 в условиях воздействия внешнего электрического поля.

3. Расчет и анализ анизотропии температурных зависимостей скоростей волн, коэффициентов задержки, коэффициентов электромеханической связи в кристаллах лангасита.

4. Исследование особенностей распространения волн Рэлея и Лява в пьезоэлектрических слоистых структурах в условиях воздействия внешнего электрического поля.

5. Оценка возможности применения изученных пьезоэлектрических кристаллов в устройствах акустоэлектроники.

Научная новизна:

1. Получены дисперсионные уравнения, описывающие распространение волн Лэмба и SH -волн в пластине точечной симметрии класса 23.

2. Получены дисперсионные уравнения, описывающие распространение волн Лява в слоистых структурах вида «кристалл точечной симметрии класса 23/изотропная среда» и «изотропная среда/кристалл точечной симметрии класса 23» под воздействием внешнего электрического поля.

3. Исследовано явление гибридизации мод упругих волн в кристаллических пьезопластинах и слоистых пьезоструктурах.

4. Представлены детальные результаты компьютерного моделирования распространения упругих волн в пластинах германосилленита и лангасита, а также в слоистых структурах «германосилленит/плавленый кварц» и «лангасит/плавленый кварц».

5. Выполнен поиск и анализ новых термостабильных направлений распространения упругих волн Лэмба и SH -мод в пластинах лангасита. Оценена возможность термокомпенсации вариаций фазовых скоростей.

Практическая значимость полученных результатов:

1. На основе полученных аналитических результатов для высокосимметричных направлений распространения упругих волн в пьезоэлектрике точечной симметрии класса 23 и их совпадения с результатами, полученными с помощью компьютерного расчета, показана корректность работы разработанного комплекса программного обеспечения. Это позволяет выполнить расчет характеристик упругих волн в кристалле любой точечной группы симметрии, для которого известен полный набор линейных материальных констант.

2. Исследование температурных зависимостей характеристик акустических волн в пластинах лангасита позволяет производить поиск перспективных для создания АЭ-устройств направлений и срезов, сочетающих значимую величину коэффициента электромеханической связи (КЭМС), минимальное отклонение потока энергии и стремящееся к нулю значение температурного коэффициента задержки скоростей. Показано, что с помощью приложения внешнего электрического поля возможно компенсировать температурные изменения скоростей упругой волны.

3. Исследовано явление гибридизации акустических волн как в пластинах, так и в слоистых структурах. Обнаружено, что гибридизация возникает вследствие нарушения исходной невозмущенной конфигурации кристаллической среды. Подобное исследование представляет интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и для различных практических приложений. В частности, для эффективного возбуждения акустических волн в пьезоэлектрических пластинах и слоистых структурах следует избегать тех направлений и условий распространения волн, при которых наблюдается явление гибридизации.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Формулировка граничных условий распространения упругой волны в пьезоэлектрической среде при воздействии внешнего однородного электрического поля для пластины и слоистой структуры.

2. Дисперсионные уравнения распространения упругой волны в пьезоэлектрике точечной симметрии класса 23 для пластины и слоистой структуры в невозмущенном случае и в случае приложения внешнего электрического поля.

3. Явление гибридизации акустических мод упругой волны в исследованных пьезоэлектриках и оценка его величины. Анализ трансформаций мод упругой волны в области гибридизации.

4. Термостабильные направления в кристаллических пластинах лангасита различных ориентаций.

Личный вклад соискателя. Выбор направления исследований и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем. Соискателем выполнен вывод основных уравнений распространения упругих волн Лэмба, *SH*-волн, волн Лява в кристаллической среде, все вошедшие в диссертацию расчеты, обработка и анализ полученных данных.

Поставленные задачи решены современными методами вычислительной математики. Научным руководителем при участии соискателя разработано программное обеспечение (ПО) для математического моделирования распространения упругих волн в пластинах и слоистых структурах. При разработке ПО и численных расчетах использовался алгоритмический язык Delphi 2009 и математический пакет Maple.

Достоверность полученных в настоящей диссертации теоретических результатов определяется корректностью использования математического аппарата для постановки задач и граничных условий, использованием точных вычислительных методов, а также количественным и качественным соответствием полученных в работе теоретических результатов экспериментальным данным и данным других авторов.

Апробация результатов диссертации. Полученные результаты были представлены на следующих научных конференциях: IEEE International Ultrasonic Symposium (Beijing, China, 2008; San Diego, USA, 2010); Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (San Francisco, USA, 2011); XXIV сессии Российского Акустического общества (Саратов, 2011).

Публикации. Список работ по теме диссертации включает 17 наименований, в числе которых 6 опубликованных статей в журналах из Перечня ВАК и ведущих зарубежных журналах, 4 статьи в материалах международных и российских конференций, 4 тезиса докладов международных конференций, 3 работы в электронных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографии и приложений. Основной объем диссертации составляет 140 страниц, в том числе 28 рисунков, 5 таблиц, библиографический список литературы из 120 наименований, в том числе 17 публикаций автора по теме диссертационной работы. Объем приложений составляет 25 страниц, в том числе 25 рисунков.

Содержание работы

Во **Введении** представлено сложившееся к настоящему времени состояние прикладных исследований распространения волн в тонких пьезоэлектрических пластинах и слоистых структурах. Обоснована актуальность темы, сформулированы цели диссертации, научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертации, а также изложено краткое содержание глав диссертации.

Глава 1 настоящей диссертации является обзорно-методической. В ней подробно рассматриваются уравнения движения и условия распространения упругих волн в пьезоэлектриках, подвергнутых влиянию внешнего однородного электрического поля.

Распространение волн малой амплитуды в пьезоэлектрической среде при воздействии электрического поля описывается уравнениями движения и электростатики:

$$\rho_0 \ddot{U}_A = \tilde{\tau}_{AB,B}; \quad \tilde{D}_{M,M} = 0. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 – плотность кристалла в недеформированном (исходном) состоянии, \tilde{U}_i – вектор динамических упругих смещений; $\tilde{\tau}_{AB,B}$ – динамический тензор деформаций; \tilde{D}_M – вектор электрической индукции. Динамические уравнения состояния пьезоэлектрической среды, полученные из разложения электрической энтальпии в ряд Тейлора, записываются в виде [1]:

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

Здесь $\tilde{\eta}_{CD}$ – тензор малых деформаций; \tilde{E}_M – вектор постоянного электрического поля; c_{ABCD}^* , e_{MAB}^* , ε_{MN}^* – эффективные упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные, зависящие от деформации и внешнего электрического поля. Подставляя в уравнения движения (1) решения в виде плоских волн и уравнения состояния пьезоэлектрической среды (2), можно получить уравнение Грина-Кристоффеля под воздействием внешнего однородного электрического поля. Решения этого уравнения позволяют определить фазовую скорость и поляризацию ОАВ.

Предполагая, что изменения скоростей упругих волн пропорциональны электрическому полю, в качестве реакции пьезосреды на приложение поля удобно ввести коэффициенты управляемости фазовых скоростей:

$$\alpha_{v_i}^E = \frac{1}{v_i(0)} \left(\frac{\Delta v_i}{\Delta E} \right)_{\Delta E \rightarrow 0}. \quad (3)$$

Приведены граничные условия, необходимые для распространения поверхностных акустических волн: равенство нулю нормальных компонент тензора напряжений и непрерывность нормальной компоненты вектора индукции D на границе раздела «кристалл-вакуум». Равенство нулю определителя системы граничных условий позволяет найти фазовые скорости ПАВ в предположении линейной зависимости от E .

Далее рассмотрены примеры практического применения упругих волн в АЭ-устройствах. Описаны устройства акустоэлектроники (новые типы датчиков, высокочастотные осцилляторы, микроактюаторы), разработанные на основе перспективных материалов (полимерные наноккомпозиты, материалы на основе углеродных нанотрубок, сплавы с «памятью формы», релаксоры).

Глава 2 посвящена изучению распространения упругих волн в пьезоэлектрической пластине под воздействием внешнего однородного электрического поля.

При воздействии внешнего однородного электрического поля уравнение Грина-Кристоффеля для упругих волн малой амплитуды в однородно деформированной среде в координатах начального состояния, и с учетом дисперсии волн, запишется в виде

$$(\Gamma_{BC} - \rho_0 \omega^2 \delta_{BC}) \alpha_B = 0; \quad B, C = 1 \dots 4; \quad \delta_{44} = 0; \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \Gamma_{BC} &= [c_{ABCD}^* + 2d_{JFC}^E c_{ABFD}^E M_J \bar{E}] k_A k_D; \\ \Gamma_{C4} &= e_{ADC}^* k_A k_D; \quad \Gamma_{4C} = \Gamma_{C4} + 2e_{APD} d_{JPC} M_J \bar{E} k_A k_D; \\ \Gamma_{44} &= -\varepsilon_{IJ}^* k_I k_J, \end{aligned} \quad (5)$$

– компоненты тензора Грина-Кристоффеля; ω – циклическая частота, \bar{E} – величина постоянного электрического поля, M_J – единичный вектор направления поля, $\vec{k} = \omega / v \vec{N}$ – волновой вектор, \vec{N} – единичный вектор, α_B – компоненты собственных векторов - упругих смещений поля плоской волны, α_4 – амплитуда волны электрического потенциала.

Эффективные материальные константы, индуцированные внешним электрическим полем, определены соотношениями

$$\begin{aligned} c_{ABKL}^* &= c_{ABKL}^E + (c_{ABKLQR}^E d_{JQR} - e_{JABKL}) M_J \bar{E}, \\ e_{NAB}^* &= e_{NAB} + (e_{NABKL} d_{JKL} + H_{NJAB}) M_J \bar{E}, \\ \varepsilon_{NM}^* &= \varepsilon_{NM}^\eta + (H_{NMAB} d_{PAB} + \varepsilon_{NMP}^\eta) M_P \bar{E}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь c_{ABKLQR}^E , e_{NABKL} , ε_{NMP}^η и H_{NMAB} – нелинейные упругие, пьезоэлектрические, диэлектрические и электрострикционные постоянные (материальные тензоры); d_{JQR} и e_{NAB} – пьезоэлектрические тензоры, c_{ABKL}^E и ε_{NM}^η – тензоры линейных упругих и диэлектрических констант.

Полные величины смещений и потенциала в тонком слое имеют вид линейных комбинаций 8 парциальных волн, соответствующих области $-h \leq X_3 \leq h$.

Распространение акустических волн в пластине удовлетворяет следующим граничным условиям: равенство нулю нормальных компонент тензора напряжений на границах раздела «кристалл-вакуум»; непрерывность электрического потенциала φ и непрерывность нормальных компонент вектора индукции D :

$$\begin{aligned} \tau_{3K} &= 0 \quad \text{при} \quad X_3 = \pm h; \\ \varphi &= \varphi^{[I]} \quad \text{при} \quad X_3 = -h; \quad \varphi = \varphi^{[II]} \quad \text{при} \quad X_3 = h; \\ D &= D^{[I]} \quad \text{при} \quad X_3 = -h; \quad D = D^{[II]} \quad \text{при} \quad X_3 = h. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $[I]$ и $[II]$ – полупространства с $X_3 > |h|$, соответствующие вакууму.

Подставив выражения (6) и решения уравнения (4) в граничные условия (7), получим систему граничных условий в предположении линейной зависимости от E . Равенство нулю определителя системы уравнений позволяет найти фазовые скорости упругих волн $v = \omega/k_1$.

В невозмущенном случае ($E=0$) для пьезоэлектрической пластины кристалла точечной симметрии класса 23 получены дисперсионные уравнения, описывающие симметричную и антисимметричную волну Лэмба, соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{\text{th}(iq_3 h)}{\text{th}(iq_1 h)} &= \frac{q_3 (c_{11}(k_1^2 - k_l^2) - c_{12}q_1^2)(c_{12}(c_{12} + c_{44}^E)k_1^2 - c_{11}(c_{11}(k_1^2 - k_l^2) + c_{44}^E q_3^2))}{q_1 (c_{11}(k_1^2 - k_l^2) - c_{12}q_3^2)(c_{12}(c_{12} + c_{44}^E)k_1^2 - c_{11}(c_{11}(k_1^2 - k_l^2) + c_{44}^E q_1^2))}, \\ \frac{\text{th}(iq_3 h)}{\text{th}(iq_1 h)} &= \frac{q_1 (c_{11}(k_1^2 - k_l^2) - c_{12}q_3^2)(c_{12}(c_{12} + c_{44}^E)k_1^2 - c_{11}(c_{11}(k_1^2 - k_l^2) + c_{44}^E q_1^2))}{q_3 (c_{11}(k_1^2 - k_l^2) - c_{12}q_1^2)(c_{12}(c_{12} + c_{44}^E)k_1^2 - c_{11}(c_{11}(k_1^2 - k_l^2) + c_{44}^E q_3^2))}, \end{aligned} \quad (8)$$

где q_1, q_3 – корни характеристического уравнения (4), соответствующего смещениям в сагиттальной плоскости $X_1 X_3$; k_l – волновое число продольной объемной волны.

При $E=0$ получены также дисперсионные уравнения для симметричных и антисимметричных SH -волн, соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{\text{th}(iq_2 h)}{\text{th}(iq_4 h)} &= \frac{q_4 (c_{44}^E \varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 + q_4^2) + 2e_{14}^2 k_1^2)(\varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 - q_2^2) + 2i\varepsilon_0 q_2 (iq_2 h))}{q_2 (c_{44}^E \varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 + q_2^2) + 2e_{14}^2 k_1^2)(\varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 - q_4^2) + 2i\varepsilon_0 q_4 (iq_4 h))}, \\ \frac{\text{th}(iq_4 h)}{\text{th}(iq_2 h)} &= \frac{q_4 (c_{44}^E \varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 + q_4^2) + 2e_{14}^2 k_1^2)(\varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 - q_2^2) + 2i\varepsilon_0 q_2 (iq_2 h))}{q_2 (c_{44}^E \varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 + q_2^2) + 2e_{14}^2 k_1^2)(\varepsilon_{11}^\eta (k_1^2 - q_4^2) + 2i\varepsilon_0 q_4 (iq_4 h))}, \end{aligned} \quad (9)$$

где q_2, q_4 – корни характеристического уравнения (4), соответствующего смещению вдоль направления, перпендикулярного сагиттальной плоскости, и связанной с ним волной электрического потенциала.

На основе приведенных выше уравнений (4-7) проанализированы изменения характеристик акустической волны в пластинах кристалла точечной симметрии класса 23 вследствие приложения внешнего электрического поля. Линейные и нелинейные материальные тензоры кристалла германосилленита ($Bi_{12}GeO_{20}$, BGO), необходимые для последующих расчетов, взяты из [1]. Отмечено, что при приложении E вдоль осей симметрии второго порядка эффективная симметрия кристалла, согласно принципу симметрии Кюри, понижается до моноклинной класса точечной симметрии 2. При этом в случае приложения $E \parallel [010]$ компоненты тензора Грина-Кристоффеля имеют тот же вид, что и в невозмущенном состоянии. На рис. 1 а, б приведены дисперсионные зависимости фазовых скоростей и коэффициентов управляемости при $E \parallel [010]$ мод S_1 и A_1 волны Лэмба в

кристалле *BGO* в зависимости от параметра h/λ_t (λ_t - длина поперечной объемной волны). Значения α_v имеют противоположные знаки для симметричных и антисимметричных мод, что объясняется эффектом гибридизации акустических волн [2].

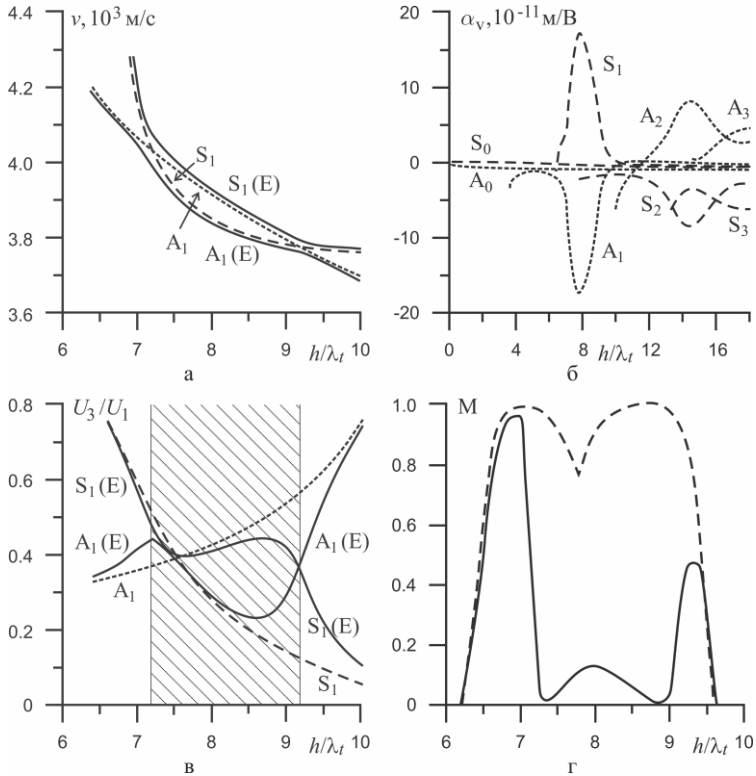


Рис. 1. Характеристики акустических мод A_1 и S_1 в области гибридизации в направлении $[100]$ плоскости (001) германосилленита ($E=0$ – штриховые линии, $E \parallel [010]$ – сплошные линии): а – фазовые скорости; б – коэффициенты управляемости при $E \parallel [010]$; в – отношения компонент упругих смещений; г – коэффициент гибридизации M

Гибридизация возникает вследствие связи колебаний частиц и обмена энергией в условиях пространственно-временного синхронизма. Возмущение материальных параметров кристалла внешними воздействиями или изменение направления распространения волн приводят к тому, что сагиттальная плоскость и/или средняя плоскость пластины перестают быть плоскостями

симметрии [3]. При этом возникает взаимодействие изначально независимых мод упругой волны.

В невозмущенном случае имеются две точки, в которых равны фазовые скорости мод S_1 и A_1 (рис. 1 а). Возмущение, заключающееся в возникновении новых эффективных материальных констант и ликвидирующее среднюю плоскость симметрии, приводит к «расталкиванию» мод Лэмба, уже не являющихся «чистыми». Снятие вырождения фазовых скоростей приводит к существенному увеличению значений коэффициентов α_v обеих гибридных мод.

Отношения нормализованных компонент упругих смещений для мод S_1 и A_1 до и после зоны гибридизации показаны на рис. 1 в. Трансформация типа волны наблюдается в диапазоне значений h/λ_t от 7.4 до 9.2 (заштрихованная область). Отметим, что внутри этой области затруднительно точно определить тип упругой волны. Но за ее пределами кривые отношений U_3/U_1 в случае приложения E стремятся к кривым в невозмущенном состоянии. Количественной характеристикой этого эффекта является коэффициент гибридизации [2]:

$$M = \frac{W^{12} + W^{21}}{W^1 + W^2}, \quad (10)$$

где $W^{12} + W^{21}$ – полная взаимная энергия двух связанных мод (усредненная по времени); W^1 , W^2 – полная энергия каждой из акустических волн. Для рассмотренной конфигурации дисперсионных ветвей даже в невозмущенном случае коэффициент M во всей области перекрытия дисперсионных зависимостей не равен нулю, что свидетельствует об энергетической связи мод на протяженном участке значений параметра h/λ_t (рис. 1 г). Протяженная область гибридизации является более сложным вариантом, чем пересечение ветвей в одной точке. Приложение внешнего электрического поля приводит к трансформации единой области гибридизации в две независимые зоны.

Другой вариант проявления гибридизации при $E \parallel [100]$ наблюдается сразу для трех мод A_1 , SH_2 и S_1 , вырождение которых при отсутствии внешнего электрического поля происходит в одной точке (рис. 2). В этом случае сагиттальная плоскость перестает быть плоскостью симметрии [3], вследствие чего моды Лэмба и SH -моды перестают быть независимыми. Ранее существовавшие точки пересечения лэмбовских и SH -ветвей исчезают – кривые «расталкиваются», приводя к снятию вырождения фазовых скоростей. Характер изменения коэффициентов управляемости в области гибридизации всех трех мод носит экспоненциальный характер.

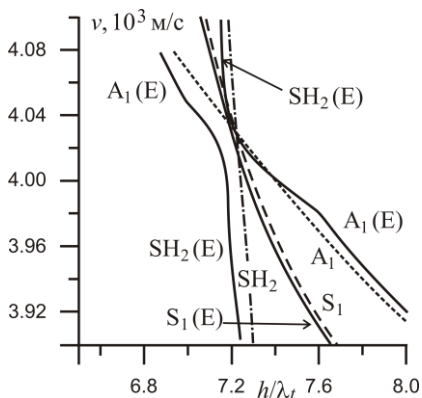


Рис. 2. Гибридизация трех акустических мод в направлении $[100]$ плоскости (001) германосилленита при $E \parallel [100]$

изменение направления распространения волн приводит к гибридизации некоторых мод упругих волн. Приложение внешнего электрического поля усиливает этот эффект.

Рассчитаны дисперсионные зависимости характеристик мод Лэмба и SH -волн нулевого и первого порядка в базовых плоскостях пластины пьезокристалла лангасита ($La_3Ga_5SiO_{14}$, LGS), подвергнутой воздействию внешнего электрического поля. Линейные и нелинейные материальные тензоры кристалла лангасита взяты из [1].

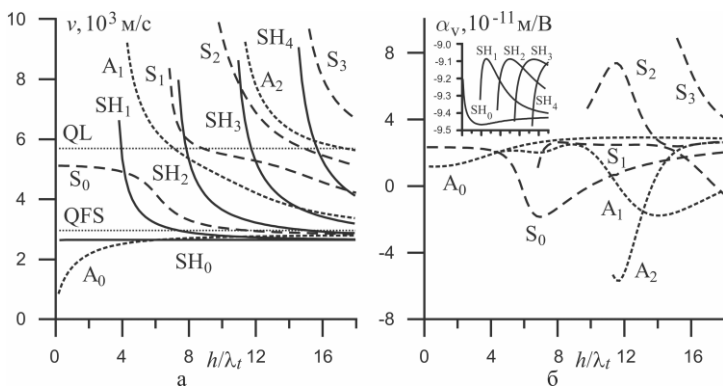


Рис. 3. Дисперсионные зависимости характеристик мод волны Лэмба и SH -волн при распространении в направлении $[010]$ плоскости (001) лангасита: а – фазовые скорости; б – коэффициенты управляемости при $E \parallel [100]$

Исследована зависимость характеристик волн Лэмба и SH -волн (фазовые скорости, КЭМС, коэффициенты управляемости) от направления распространения в плоскостях (001) и $(0 \bar{1} 0)$ кристалла германосилленита в случае приложения электрического поля вдоль осей X_1 , X_2 , X_3 рабочей системы координат. Проведено сравнение поведения волн в пластине с поведением ОАВ. Характеристики волн рассчитывались для различных значений параметра $h \times f = 500 \dots 2500$ м/с. Отмечено, что

Например, на рис. 3 а приведены дисперсионные зависимости фазовых скоростей волн Лэмба и *SH*-волн от параметра h/λ , при распространении волны в направлении [010]. При приложении электрического поля вдоль направления [100] моды акустических волн остаются «чистыми», поведение коэффициентов α_v для волн Лэмба и *SH*-волн показано на рис. 3 б. Приложение $E \parallel [001]$, совпадающей с осью симметрии третьего порядка, приводит, согласно принципу симметрии Кюри, к трансформации к группе точечной симметрии 3. В этом случае уменьшение симметрии происходит вследствие нелинейного пьезоэффекта и электрострикции и отмечается сильный эффект гибридизации.

Проведен анализ анизотропии параметров распространения волн (фазовые скорости, коэффициенты электромеханической связи, коэффициенты управляемости) в базовых плоскостях (001), (100), (010) и $(1\bar{1}0)$ пластины кристалла лангасита при воздействии внешнего электрического поля вдоль осей X_1 , X_2 и X_3 в рабочей системе координат. Для набора исследованных срезов определены направления распространения волн Лэмба и *SH*-волн с экстремальными значениями коэффициентов α_v и приведены в сводной таблице.

Рассмотрена анизотропия углов отклонения потока энергии и температурных коэффициентов задержки скоростей в базовых плоскостях (001), (100), (010) и $(1\bar{1}0)$, а также в повернутых *Y*- и *Z*- срезах лангасита. Температурный коэффициент задержки определяется выражением

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

Здесь величина α'_{11} – эффективный коэффициент линейного теплового расширения вдоль направления распространения волны, TCv – температурный коэффициент фазовой скорости, TCF – температурный коэффициент частоты. Термостабильные направления определяются при условии равенства нулю температурных коэффициентов задержки акустической волны; кроме того, TCD изменяет знак в окрестности этого направления. Приведены примеры результатов компьютерного расчета для всех исследованных срезов.

Как правило, для разработки АЭ-устройств используют кристаллографические срезы и направления с максимальным значением КЭМС. Но часто подобные направления обладают неудовлетворительным уровнем термостабильности. Компенсировать температурные вариации фазовых скоростей акустических волн возможно приложением внешнего электрического поля вдоль направления, в котором предварительно был обнаружен максимальный КЭМС. Рассчитать величину электрического поля, которое компенсирует температурный скачок фазовой скорости, можно по формуле $\Delta v/v(0) = TCv \times \Delta T - \alpha_v \times \Delta E = 0$.

Кроме того, в данном разделе проведено сравнение точности расчетов и данных эксперимента [4] для температурных зависимостей параметров волн Рэлея.

Глава 3 диссертации посвящена изучению распространения упругих волн в пьезоэлектрических слоистых структурах под воздействием внешнего однородного электрического поля.

В слоистой системе, состоящей из упругого слоя толщины h и полубесконечной подложки из другого материала, распространяются волны рэлеевского типа и волны с поперечно-горизонтальной поляризацией (волны Лява). Уравнение Грина-Кристоффеля для каждой из сред при воздействии внешнего электрического поля запишется в виде (4).

Распространение акустических волн в пьезоэлектрической слоистой структуре под воздействием внешнего электрического поля должно удовлетворять соответствующим граничным условиям: обращение в нуль на свободной поверхности нормальных компонент тензора напряжений; непрерывность касательных к поверхности раздела компонент вектора напряженности электрического поля, что обеспечивается условием непрерывности электрического потенциала на границе раздела «слой-вакуум»; равенство нормальных компонент тензоров напряжений и непрерывность электрического потенциала на границе «слой-подложка» при $X_3 = 0$:

$$\begin{aligned} \tau_{3A}^{(L)} &= 0 \Big|_{x_3=h}; & D_3^{(L)} &= D^{(\text{вак})} \Big|_{x_3=h}; \\ U_A^{(S)} &= U_A^{(L)} \Big|_{x_3=0}; & \varphi^{(S)} &= \varphi^{(L)} \Big|_{x_3=0}; \\ \tau_{3A}^{(S)} &= \tau_{3A}^{(L)} \Big|_{x_3=0}; & D_3^{(S)} &= D_3^{(L)} \Big|_{x_3=0}. \end{aligned} \quad (12)$$

Индексы L и S относятся к слою и подложке, соответственно.

Подставив решения в виде плоских волн с учетом решений (4) для каждой из сред в граничные условия (12), получим систему уравнений для расчета параметров распространения акустических волн. Выражения (12) представляют собой систему из 12-ти однородных уравнений с неизвестными весовыми коэффициентами. Равенство нулю определителя данной системы позволяет найти решения относительно k_1 и вычислить фазовые скорости волн.

С помощью решения системы (12) получены аналитические соотношения, описывающие распространение «чистых» мод акустических волн Лява в структурах «изотропный слой/пьезоэлектрическая подложка» и «пьезоэлектрический слой/ изотропная подложка».

Например, для слоистой структуры из изотропного упругого материала на подложке из пьезоэлектрического кристалла *BGO* в направлении [100] плоскости (001) получено дисперсионное уравнение, описывающее пьезоактивную шестипарциальную волну Лява:

$$c_{44}^{E(L)} is \operatorname{th}(sh) = \frac{AB}{\varepsilon_{11}^{\eta(S)}} \times \frac{1}{B(k_1^2 + A^2) - QA(k_1^2 + B^2)} \times$$

$$\times \left\{ \left[c_{44}^{E(S)} \varepsilon_{11}^{\eta(S)} (k_1^2 + A^2) + 2(e_{14}^{(S)})^2 k_1^2 \right] - \right.$$

$$\left. - Q \left[c_{44}^{E(S)} \varepsilon_{11}^{\eta(S)} (k_1^2 + B^2) + 2(e_{14}^{(S)})^2 k_1^2 \right] \right\}, \quad (13)$$

где $\pm ik_1$, $\pm is$ – корни характеристического уравнения слоя,

$s = \sqrt{\frac{\rho_0^{(L)} \omega^2}{c_{44}^{(L)}} - k_1^2}$; $A = k_3^{(S(1))}$, $B = k_3^{(S(2))}$ – корни характеристического

уравнения подложки с отрицательной мнимой частью;

$$Q = \frac{B(\varepsilon_{11}^{\eta(S)}(k_1^2 - A^2) + i2A\bar{\varepsilon})}{A(\varepsilon_{11}^{\eta(S)}(k_1^2 - B^2) + i2B\bar{\varepsilon})}; \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon_{11}^{\eta(L)} k_1 \operatorname{th}(k_1 h) + \varepsilon_0.$$

Кроме того, для этой структуры получено дисперсионное уравнение, описывающее пьезоактивную шестипарциальную волну Лява при приложении поля $E \parallel [010]$. Также приведено дисперсионное уравнение, описывающее пьезоактивную шестипарциальную волну Лява в структуре «BGO/плавленый кварц».

Далее представлены результаты компьютерного расчета дисперсионных зависимостей параметров акустических волн Рэлея и Лява в слоистых структурах «BGO/плавленый кварц» и «LGS/плавленый кварц» в различных срезах и направлениях распространения.

Рассчитана анизотропия параметров распространения акустических волн в слоистых структурах «LGS/плавленый кварц» и «BGO/плавленый кварц» в базовых плоскостях при воздействии постоянного электрического поля. Например, исследована анизотропия характеристик упругой волны в структуре (001) «LGS/плавленый кварц». Вдоль направления [010] (направление распространения «чистых» мод) для моды L_0 максимум КЭМС равен 1.1% при $h \times f = 1000$ м/с. Угол отклонения потока энергии для мод волны Лява максимален при значении $h \times f = 2500$ м/с и равен 16.4°, для мод волны Рэлея – при значении $h \times f = 4000$ м/с и равен -16.8°. Приложение электрического поля вдоль X_3 , т.е. вдоль оси симметрии 3-го порядка, понижает симметрию кристалла до тригональной класса 3 и увеличивает значения угла отклонения потока энергии (PFA) несущественно (на 0.2°), но приложение поля вдоль X_1 может увеличить значение угла отклонения потока энергии до 2°.

Наиболее перспективные направления в рассмотренных срезах слоистых структур «LGS/плавленый кварц» и «BGO/плавленый кварц» приведены в итоговой таблице.

В **Заключении** приводятся основные выводы, соответствующие полученным в диссертации результатам.

1. Сформулированы граничные условия распространения упругих волн в пьезоэлектрической пластине под воздействием внешнего однородного электрического поля.

2. Сформулированы граничные условия распространения упругих волн в пьезоэлектрической слоистой структуре под воздействием внешнего однородного электрического поля.

3. Получены дисперсионные уравнения для определения скоростей волн Лэмба и *SH*-волн в высокосимметричных направлениях распространения в пьезоэлектрическом кубическом кристалле класса 23 в невозмущенном случае.

4. Получены дисперсионные уравнения для определения скоростей волн Лява в структурах «изотропная среда/кристалл точечной симметрии класса 23» и «кристалл точечной симметрии класса 23/изотропная среда» как в невозмущенном случае, так и при воздействии внешнего электрического поля.

5. Обнаружено, что эффект гибридизации акустической волны может проявляться как в виде снятия вырождения фазовых скоростей, так и без непосредственного контакта поверхностей фазовых скоростей. Показано, что приложение электрического поля вдоль некоторых направлений распространения может как усиливать, так и ослаблять эффект гибридизации.

6. Найдены кристаллографические направления с экстремальными величинами коэффициентов управляемости фазовых скоростей нулевых и первых мод волны Лэмба и *SH*-волны в пластинах *BGO* и *LGS*, а также в структурах «*BGO*/плавленый кварц» и «*LGS*/плавленый кварц». Показано, что с помощью приложения внешнего электрического поля возможно эффективно управлять скоростью некоторых мод упругой волны.

7. Определены термостабильные срезы и направления распространения упругой волны в пластинах лангасита. Показано, что с помощью приложения внешнего электрического поля возможно добиться нулевого значения температурного коэффициента задержки скоростей волны.

8. Определены направления распространения акустической волны, обладающие оптимальными характеристиками и наиболее перспективные для создания АЭ-устройств. Полученные данные в сочетании с установленными сведениями об анизотропии влияния внешнего электрического поля на распространение акустических волн различных типов в пластинах и слоистых структурах могут представлять особый интерес для создания высокостабильных устройств акустоэлектроники и пьезотехники.

Список цитированной литературы

1. 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.

2. Кузнецова И. Е., Зайцев Б. Д., Теплых А. А., Бородина И. А. Особенности «гибридизации» акустических волн в пьезоэлектрических пластинах // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53. – № 1. – С. 73-79.
3. Альшиц В. И., Любимов В. Н., Радович А. Топологические перестройки в акустическом спектре анизотропной пластины при асимметричных возмущениях // Кристаллография. – 2010. – Т. 55. – № 6. – С. 1003-1012.
4. Naumenko N., Solie L. Optimal cuts of langasite, $La_3Ga_5SiO_{14}$ for SAW devices // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Control. – 2001. – V. 48. – № 2. – P. 530-537.

Публикации по теме диссертации

1. 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.
2. Золотова О. П., Бурков С. И., Сорокин Б. П. Распространение волн Лэмба и SH -волн в пластине пьезоэлектрического кубического кристалла // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2010. – Т. 3. – № 2. – С. 185-204.
3. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Influence of the external electric field on propagation of lamb waves in piezoelectric plates // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Control. – 2011. – V. 58. – № 1. – P. 239-243.
4. 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 // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2011. – Т. 4. – № 3. – С. 282-291.
5. 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.
6. Золотова О. П., Бурков С. И., Сорокин Б. П., Теличко А. В. Упругие волны в пьезоэлектрических слоистых структурах. // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2012. – Т. 5. – № 2. – С. 164-186.
7. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Influence of the external electric field on propagation of Lamb waves in thin piezoelectric sheets // Abstracts of IEEE Ultrason. Symp. – Beijing, China. – 2008. – P. 409-410.
8. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P. Influence of the external electric field on propagation of Lamb waves in thin piezoelectric sheets // Proceedings of IEEE Ultrason. Symp. – Beijing, China. – 2008. – P. 1812-1814.
9. Sorokin B., Burkov S., Zolotova O. Anisotropy propagation of Lamb waves in thin piezoelectric plates under the influence of bias electric field // Abstracts of IEEE Ultrason. Symp. – Rome, Italy. – 2009. – P. 752.

10. 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 // Abstracts of IEEE Ultrason. Symp. – San Diego, USA. – 2010. – P. 393.
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 and SH waves in langasite single crystal plates // Proceedings of IEEE Ultrason. Symp. – San Diego, USA. – 2010. – P. 1853-1856.
12. 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 // Final program of 2011 Joint Conference of the IEEE IFCS/EFTF proceedings. – San Francisco, USA. – 2011. – P. 32.
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 // Proceedings of 2011 Joint Conference of the IEEE IFCS/EFTF. – San Francisco, USA. – 2011. – P. 117-120.
14. Бурков С. И., Золотова О. П., Сорокин Б. П. Влияние постоянного электрического поля на дисперсионные характеристики акустических волн в пьезоэлектрических слоистых структурах // Труды XXIV сессии РАО. – Саратов, 2011. – Т. 1. – С. 266-270.
15. 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 [Электронный ресурс]// Cornell University Library: [сайт]. [2012]. URL: <http://arxiv.org/abs/1008.2058>. (дата обращения: 20.01.2012).
16. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. 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]. [2012]. URL: <http://arxiv.org/abs/1012.0657>. (дата обращения: 20.01.2012).
17. 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: 20.01.2012).

Подписано в печать 19.11.2012 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 60. Заказ № 94

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38, ИФ СО РАН