

*На правах рукописи*



**Николаевцев Виктор Андреевич**

**ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В НЕИНЕРЦИАЛЬНЫХ  
СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА, СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ И  
СТРУКТУРАХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ**

Специальность 01.04.03. - радиоп физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2012

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела  
факультета нано- и биомедицинских технологий  
Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
профессор кафедры физики твердого тела  
Сучков Сергей Германович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Анисимкин Владимир Иванович  
главный научный сотрудник Института  
радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова  
РАН (г.Москва)

доктор физико-математических наук,  
профессор, Петров Владимир Владимирович,  
профессор кафедры прикладной физики  
Саратовского государственного  
университета им. Н.Г.Чернышевского.

Ведущая организация: ФГУП Научно-производственное предприятие  
“Салют” (г. Н. Новгород)

Защита диссертации состоится 31 мая 2012 г. в 15 часов 30 минут на заседании  
диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном уни-  
верситете (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. В.А. Артисевич  
Саратовского государственного университета имени Н.Г.Чернышевского

Автореферат разослан «27» апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Аникин Валерий Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последние два десятилетия ученые, занимающиеся конструированием приборов на поверхностных акустических волнах (ПАВ), уделяют внимание проблеме их использования в неинерциальных системах отсчета. Эти вопросы регулярно обсуждаются в научной литературе и на международных симпозиумах. Интерес к этим вопросам связан с тем, что в работе сложных измерительных систем, установленных в движущихся объектах и использующих приборы на ПАВ с высокой стабильностью фазовых характеристик, иногда появляются ошибки. В настоящее время в некоторых системах оборонного назначения и в системах радиоастрономических измерений с использованием наземного и космического телескопов требование к кратковременной стабильности (до суток) резонансной частоты резонаторов на ПАВ в диапазоне 100-300 МГц составляет  $10^{-11}$ . Для обеспечения такой стабильности недостаточно собственной термостабильности приборов на ПАВ и применяют дополнительное термостатирование до долей градуса. Для оценки стабильности таких устройств при эксплуатации необходимо было оценить влияние динамики прибора на его характеристики. Для ускоренного прямолинейного движения приборов на ПАВ наиболее достоверные результаты получены научной группой под руководством профессора Коссинского (США), что признано научным сообществом. Результаты их теоретических и экспериментальных исследований [1] показали, что чувствительность фазовых характеристик приборов на ПАВ при прямолинейном движении с ускорением составляет  $10^{-12}/g$  и является несущественной для указанных требований к стабильности. В то же время результаты исследований влияния вращения на характеристики приборов на ПАВ были противоречивыми. С одной стороны, в работе научной группы под руководством профессора Янга (Китай) теоретически предсказывались высокая чувствительность и возможность создания датчиков угловой скорости на ПАВ [2]. С другой стороны многочисленные попытки создания таких приборов не увенчались успехом. Поэтому представляет теоретический и практический интерес выяснение причины этого противоречия.

Хорошо известно и подробно было изучено в множестве работ распространение различных типов волн в слоистых структурах. Была подробно изучена дисперсия скорости различных типов волн в одно- и многослойных кристаллических структурах. Однако в этом множестве работ не было обращено внимание на возможность дисперсии угла отклонения потока при распространении ПАВ в неосевых направлениях кристалла. Впервые этот вопрос был рассмотрен в работе [3], в которой рассчитывалась дисперсия угла потока в структуре «металлическая пленка-пьезокристалл». Была показана возможность достижения значительной угловой дисперсии (до  $20^\circ$ ) в широком диапазоне частот (до 500 МГц). На основе этих результатов был предложен чисто акустический частотный дефлектор [4], имеющий ряд преимуществ перед широко используемыми в настоящее время акустооптическими частотными дефлекторами.

Однако на частотах выше 1 ГГц поток энергии ПАВ распространяется преимущественно в металлическом слое, поэтому резко растут потери на распространение, что затрудняет создание акустического дефлектора на основе такой структуры. В связи с реальной потребностью создания акустического частотного дефлектора требуется рассмотреть другие виды структур, в которых затухание ПАВ было бы значительно меньше. Очевидно, такие структуры должны содержать не аморфные, а монокристаллические пленки, например, из нитрида алюминия, окиси цинка или полупроводниковую эпитаксиальную пленку антимонида индия, технология нанесения которых хорошо отработана. Поэтому требуется проведение расчетов дисперсии угла отклонения потока в слоистых структурах с монокристаллическими пленками.

Известно, что на частотах выше 3 ГГц резко возрастает затухание ПАВ из-за того, что длина волны ПАВ становится сравнимой с размерами неоднородностей на поверхности. Поэтому для создания приборов на таких частотах нужно переходить к приповерхностным объемным акустическим волнам (ПОАВ), которые слабо чувствуют неоднородности на поверхности. В слоистой структуре поток энергии ПОАВ почти параллелен поверхности и для снижения затухания волны должен иметь максимальную плотность не в пленке, где потери велики, а в кристалле. Кроме того, волна должна иметь низкое дифракционное затухание. В начале 1980-х годов научной группой под руководством академика Ю.В.Гуляева был теоретически предсказан и затем экспериментально подтвержден эффект снижения затухания поперечных объемных акустических волн (ОАВ) в алюмоиттриевом гранате и алюмомагниево-шпинели при введении в кристалл небольшого количества редкоземельных примесей [5]. Данный эффект имеет чисто квантовую природу. В диссертации предложено исследовать возможность использования данного эффекта для создания высокочастотных (свыше 3 ГГц) интегральных акустоэлектронных приборов, использующих поперечную ПОАВ. Для возбуждения ПОАВ в слоистых структурах на основе АИГ[001] можно использовать только так называемый «ускоряющий» слой, который обеспечивает распространение акустической энергии преимущественно в кристалле. Для данных целей подходит структура  $\text{AlN}[001]/\text{АИГ}[001]$ , поэтому необходимо провести расчеты возбуждения линейным источником всех возможных типов акустических волн в таких слоистых структурах и найти условия возникновения ПОАВ.

В последнее время в связи с широким применением закаленного стекла в строительстве высотных зданий, а также в автомобильной, авиационной и космической промышленности участились случаи их спонтанного разрушения. Хотя эти стекла проверялись всеми существующими методами лазерной и ультразвуковой дефектоскопии и были признаны годными, тем не менее, бывают случаи их разрушения в процессе эксплуатации до достижения срока службы. Следовательно, в признанных годными стеклах остаются дефекты, которые не обнаруживаются существующими методами. Поэтому для создания современных средств ультразвукового контроля качества закаленного листового стекла требуется разработка нового способа достоверного определения на-

личия, положения и размеров всех микро- и нанотрещин и дефектов в пластинах.

Разрешение перечисленных проблем, проведенное в данной работе, вносит вклад в развитие современной радиоэлектроники и являются актуальными.

В соответствии с перечисленными задачами **целью диссертационной работы** является получение теоретических результатов анализа особенностей распространения ПАВ в неинерциальных системах отсчета, в слоистых кристаллических структурах, и теоретических и экспериментальных результатов по возбуждению и рассеянию на неоднородностях волн Лэмба.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые были сформулированы граничные условия на поверхности упругого полупространства во вращающейся системе координат и проведено точное решение граничной задачи о влиянии силы Кориолиса, учитываемой как в уравнениях движения, так и в граничных условиях, на величину фазовой скорости ПАВ во вращающемся кристалле.
2. Показано, что влияние силы Кориолиса на девиацию скорости волн Рэлея, Гуляева-Блюстейна, вытекающей ПАВ и объемной поперечной волны может достигать  $10^{-8}$  в относительных величинах при угловой скорости вращения 1 об/с.
3. Показано, что чувствительность приборов на ПАВ к вращению снижается при повышении частоты ПАВ, а также зависит от взаимной ориентации оси вращения и направления распространения ПАВ. Так, показано, что существует плоскость нулевой чувствительности, содержащая все возможные направления вектора угловой скорости, при которых девиация фазовой скорости ПАВ равна нулю, в частном случае – параллельно оси вращения.
4. Впервые теоретически исследована дисперсия угла отклонения потока энергии ПАВ в слоистой структуре «пьезоэлектрическая пленка-кристалл». Обнаружено, что в некоторых направлениях дисперсия угла отклонения потока энергии может составлять десятки градусов в полосе частот до 500 МГц вблизи кроссовера дисперсионных характеристик волновых мод слоистой структуры.
5. Впервые предложено для снижения потерь на распространение и повышения диапазона частот акустоэлектронных устройств использовать приповерхностную акустическую волну поперечного типа в слоистой структуре, содержащей «ускоряющую» пьезоэлектрическую пленку на поверхности кристалла алюмоиттриевого граната (АИГ) с редкоземельными примесями.
6. Впервые показано, что в структуре, содержащей пленку AlN на поверхности АИГ существует приповерхностная акустическая волна поперечного SV-типа, в которой упругая энергия распространяется преимущественно в кристалле, а не в пленке, что обеспечивает аномально низкое затухание в СВЧ диапазоне.

7. Впервые строго решена полевая задача о преобразовании продольной объемной акустической волны в клиновидном преобразователе в волны Лэмба, получены частотные и угловые характеристики эффективности их возбуждения.
8. Найдены условия возбуждения необходимых для дефектоскопии мод Лэмба с требуемым распределением ультразвуковой энергии по сечению пластины.
9. Впервые экспериментально обнаружено рождение, уничтожение и пиннинг нанотрещин в листовом стекле при приложении и снятии нагрузки. Поэтому ультразвуковой контроль материала на неустойчивость к появлению нанотрещин нужно производить при знакопеременных напряжениях.
10. Впервые на созданной лабораторной установке и с помощью разработанного программного обеспечения получено распределение нанотрещин и локальных дефектов в листовом стекле.

**Достоверность полученных в диссертации результатов** основана на строгой постановке и решении граничных задач пьезоакустики и подтверждается хорошим соответствием результатов расчетов с экспериментальными и теоретическими результатами как других авторов, так и с экспериментальными результатами, полученными самим автором.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Условие равенства нулю механических напряжений на свободной поверхности упругого полупространства в неинерциальной (вращающейся) системе координат не выполняется вследствие действия силы Кориолиса на движущиеся частицы в кристалле, и граничное условие имеет вид

$$\sigma_{i3}^{(0)}(\bar{\Omega}) = \sigma_{i3}^{(0)}(0) + \int_{-\infty}^0 F_{Cor,i}(\bar{\Omega}, x_3) dx_3 = 0,$$

где  $\sigma_{i3}^{(0)}(\bar{\Omega})$  - компоненты тензора механических напряжений на свободной поверхности при вращении с угловой скоростью  $\bar{\Omega}$ ,  $\sigma_{i3}^{(0)}(0)$  - компоненты тензора механических напряжений на свободной поверхности в инерциальной системе отсчета,  $F_{Cor,i}(\bar{\Omega}, x_3) = 2\rho\varepsilon_{ijk}\dot{u}_j\Omega_k$  - компоненты силы Кориолиса, действующей на частицу с координатой  $x_3$ , движущейся со скоростью  $\dot{u}_j$ ,  $\rho$  - плотность,  $\varepsilon_{ijk}$  - компоненты единичного антисимметричного тензора Леви-Чивитты,  $\Omega_k$  - компоненты вектора угловой скорости вращения кристалла.

2. Множество направлений вектора угловой скорости, при которых девиация фазовой скорости ПАВ при вращении равна нулю, образует плоскость.
3. В слоистых структурах дисперсия угла отклонения потока энергии ПАВ максимальна вблизи кроссовера дисперсионных характеристик фазовой скорости волновых мод.
4. В структуре, содержащей пленку AlN на поверхности АИГ, существует приповерхностная акустическая волна поперечного SV-типа, в которой

упругая энергия распространяется преимущественно в кристалле и вдоль поверхности раздела с пленкой, что обеспечивает низкое затухание сигнала в СВЧ диапазоне.

5. Достоверное определение наличия, положения, размеров и формы микро- и нанотрещин и дефектов в пластинах при ультразвуковой локации возможно при возбуждении преимущественно одной моды Лэмба и использовании нескольких приемных преобразователей.

### **Практическая ценность работы:**

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы для снижения погрешностей радиолокационных измерений за счет правильного расположения акустоэлектронных приборов в подвижных объектах, для разработки перспективных миниатюрных устройств обработки сигналов в системах РЭБ, а также для расширения диапазона работы акустоэлектронных устройств, изготавливаемых по планарной технологии. Разработка лабораторной установки контроля качества стекла проводилась по заказу Саратовского института стекла и ее развитием будет промышленная установка, отличающаяся от лабораторной установки большими размерами, большим количеством излучателей и приемников, расположенных на подвижном держателе размером не менее  $1\text{ м}^2$ .

### **Личный вклад автора.**

Автору принадлежит разработка алгоритмов и программ для расчета фазовых характеристик ПАВ в неинерциальных системах отсчета, в структурах с пьезоэлектрическим слоем, расчета угловых и частотных характеристик возбуждения волн Лэмба. Постановка задач, выбор методов решения и обсуждение полученных результатов были проведены автором совместно с научным руководителем. Создание лабораторной установки и получение экспериментальных результатов проведено совместно с А.В.Селифоновым.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: FORUM ACUSTICUM 2011 27 June - 1 July, Aalborg, Denmark (EAA), XXIV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН, 12 - 15 сентября 2011 г., Саратов.

Материалы работы использовались при выполнении следующих проектов: Научный грант по программе «У.М.Н.И.К» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по теме «Система неразрушающего контроля микро- и нанотрещин в листовом стекле» (2010), Научный грант Committee for International Research and Education (CIRE) of the Acoustical Society of America (ASA) по теме «Nondistructive Control System of Micro- and Nanofractures in the Sheet Glass» (2011).

## Публикации.

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 11 работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 4 статьи в трудах конференции, 3 статьи в региональных журналах и 2 тезисов в трудах конференции.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 130 страниц. Основной текст занимает 107 страниц, включая 59 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 85 наименований и изложен на 9 страницах.

## Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулирована их основная цель и решаемые задачи, научная новизна и практическая ценность работы, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

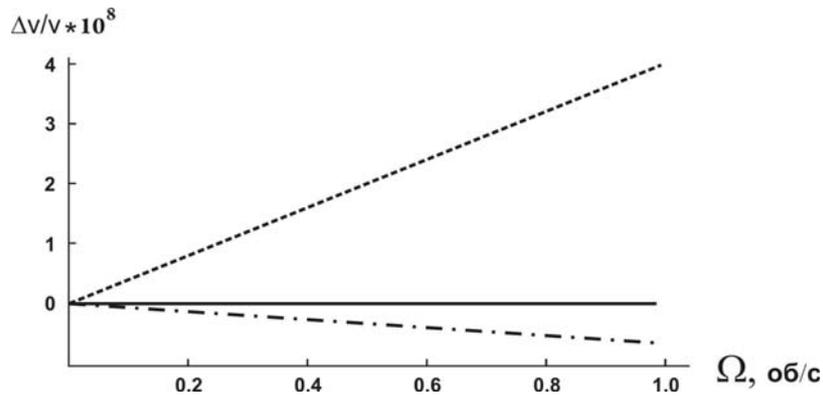
Глава 1 посвящена теоретическому исследованию распространения ПАВ в неинерциальных системах отсчета, влияния вращения приборов на ПАВ на их характеристики, а также нахождению условий и способов снижения этого влияния. Описана постановка задачи о ПАВ в неинерциальной системе отсчета, приведены основные уравнения, используемые в расчетах фазовых характеристик ПАВ.

Сформулированы модифицированные уравнения движения упругой пьезосреды и граничные условия на поверхности упругого полупространства во вращающейся системе координат

$$\rho \ddot{u}_i = c_{ijlm} \partial_j \partial_l u_m + e_{ij} \partial_j \partial_l \varphi + 2\rho \varepsilon_{ijk} \dot{\Omega}_k,$$
$$\sigma_{i3}^{(0)} = -i \sum_{v=1}^4 (c_{i3lm} P_{mv} + e_{li3}) k_l^{(v)} \varphi_v - 2\rho \omega \varepsilon_{ijk} \Omega_k \sum_{v=1}^4 \frac{P_{jv}}{k_3^{(v)}} \varphi_v = 0$$

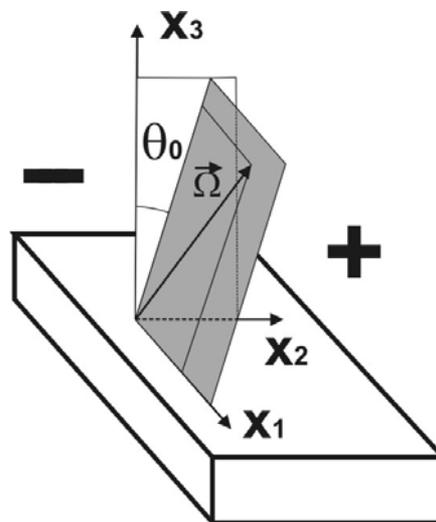
где  $\rho$  - плотность материала,  $u_l$  - компоненты упругих смещений,  $c_{ijlm}$  - тензор модулей упругости,  $\partial_i$  - оператор дифференцирования по  $i$ -й координате,  $e_{ijl}$  - компоненты тензора пьезомодулей,  $\varphi$  - скалярный электрический потенциал,  $\Omega_k$  - компоненты вектора угловой скорости вращения кристалла,  $\varepsilon_{ijk}$  - компоненты единичного антисимметричного тензора Леви-Чивитты,  $\sigma_{i3}^{(0)}$  - компоненты тензора механических напряжений на свободной поверхности пьезокристалла,  $P_m^v$  - поляризационные коэффициенты,  $k_l^v$  - волновые числа парциальных мод четырехкомпонентной ПАВ,  $\varphi^v$  - парциальные потенциалы,  $\omega$  - круговая частота, точки обозначают дифференцирование по времени.

Проведено точное решение граничной задачи о влиянии силы Кориолиса, учитываемой как в уравнениях движения, так и в граничных условиях, на величину фазовой скорости ПАВ во вращающемся кристалле.



**Рис. 1** Зависимости относительной величины девиации фазовой скорости ПАВ в ST, X-срезе кварца от угловой скорости вращения при частоте ПАВ 30 МГц при направлениях вектора угловой скорости вдоль направления распространения ПАВ (сплошной линией), перпендикулярно сагиттальной плоскости (штриховой линией) и перпендикулярно плоскости среза кристалла (пунктиром).

На основе разработанного метода был проведен точный расчет для часто используемых на практике срезов (ST-среза кварца,  $Y+128^\circ$ -среза ниобата лития ( $LiNbO_3$ ) и Z-среза арсенида галлия ( $GaAs$ ) для разных типов волн - Релея, Гуляева-Блюстейна, поверхностной вытекающей и объемной поперечной волны) и было показано, что девиация фазовой скорости волн Рэлея, Гуляева-Блюстейна и вытекающей ПАВ вследствие влияния силы Кориолиса может достигать  $10^{-8}$  в относительных величинах при угловой скорости вращения 1 об/с и пропорциональна угловой скорости (рис. 1).



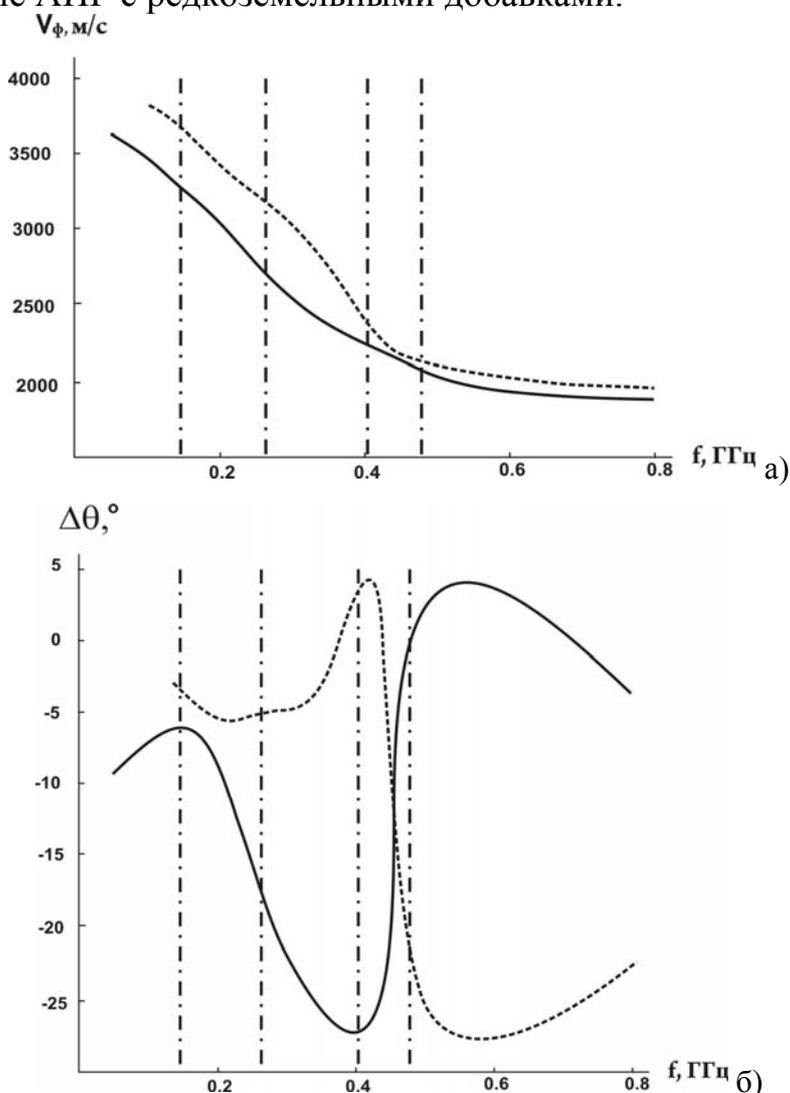
**Рис. 2.** Положение плоскости нулевого влияния кориолисовой силы в системе координат, связанной с кристаллом

Практический интерес представляет исследование чувствительности к вращению от направления вектора угловой скорости. Результаты расчетов показали, что для снижения чувствительности к вращению нужно ориентировать акустическую ось кристалла, по которой распространяется ПАВ, по отношению к оси вращения в плоскости нулевой чувствительности (которая для каждого из рассмотренных срезов была найдена). Важным частным случаем является ори-

ентация направления ПАВ параллельно оси вращения (рис. 2). Так для ST-среза кварца линейный угол двумерного угла между данной и сагиттальной плоскостью  $\theta_0=10^\circ$ , для Y+128°-среза ниобата лития  $\theta_0=4^\circ$ , а для Z-среза арсенида галлия эта плоскость вследствие симметрии совпадает с сагиттальной.

Было показано, что задача о влиянии центробежной силы инерции и ускоренного вращения на фазовые характеристики ПАВ сводится к задаче о влиянии поступательного движения с ускорением, которая была решена в работах [1].

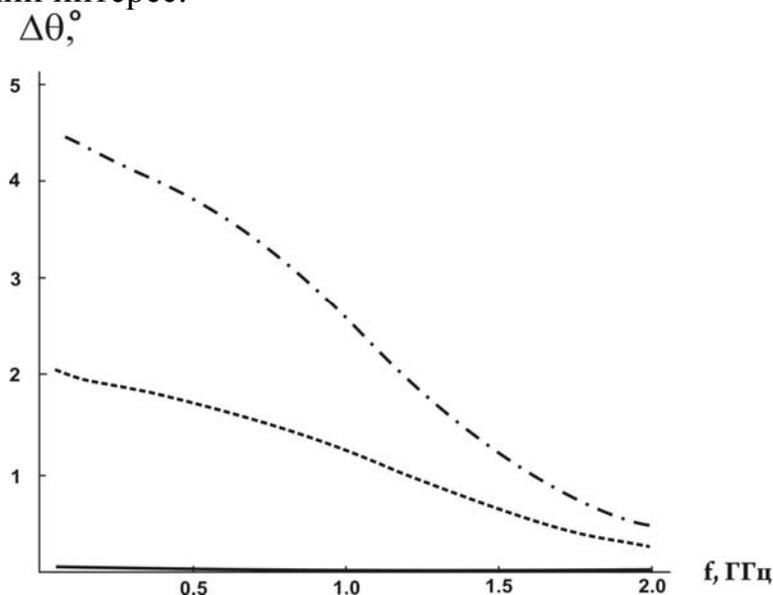
**Глава 2** посвящена теоретическим исследованиям особенностей распространения и возбуждения акустических волн в слоистых структурах. Так, проведены исследования дисперсии угла отклонения потока энергии ПАВ в слоистых структурах «кристалл – пьезоэлектрический слой», а также способов ее повышения и снижения. Исследованы возможности снижения потерь на распространение в приборах на ПАВ для расширения частотного диапазона их работы за счет использования эффекта аномально низкого затухания поперечных волн в кристалле АИГ с редкоземельными добавками.



**Рис. 3** Дисперсия а) фазовой скорости б) угла  $\Delta\theta$  в структуре InSb[001]/срез Y+128°LiNbO<sub>3</sub> при угле  $\theta=26^\circ$  для толщины пленки 2 мкм: сплошной линией – низшей моды, штриховой линией – первой высшей моды. Пунктиром обозначены границы областей высокой дисперсии вблизи кроссовера.

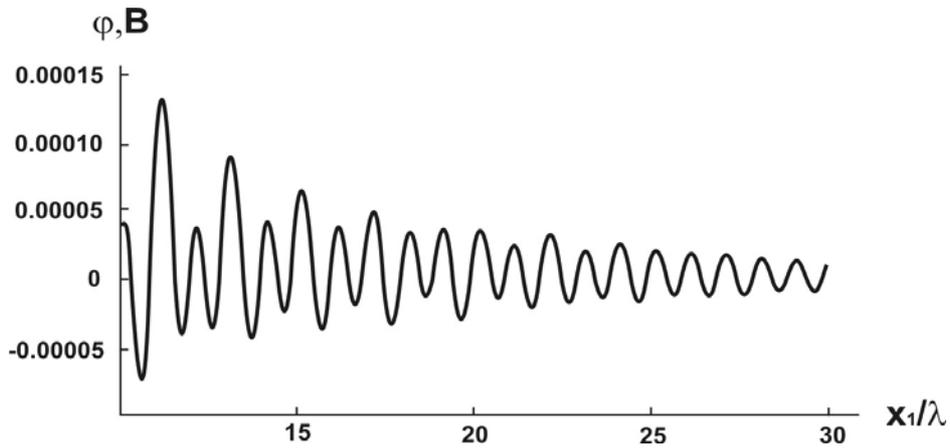
Проведены расчеты характеристик ПАВ в слоистых структурах «пьезоэлектрический слой на непьезоэлектрической подложке» и «пьезоэлектрический слой на пьезоэлектрической подложке».

Приводятся результаты теоретического исследования дисперсии угла  $\Delta\theta$  отклонения потока энергии ПАВ от направления волнового вектора в имеющих практическое значение слоистых структурах типа ZnO[001]/Сапфир[001], AlN[001]/Сапфир[001], InSb[001]/срез Y+128°LiNbO<sub>3</sub>. В структурах ZnO[001]/Сапфир[001] и InSb[001]/срез Y+128°LiNbO<sub>3</sub> были обнаружены области, в которых дисперсия угла  $\Delta\theta$  высока и может составлять десятки градусов в полосе частот до 500 МГц. Во всех случаях наибольшая дисперсия наблюдалась вблизи кроссовера дисперсионных характеристик соседних волновых мод слоистой структуры (рис. 3). Для всех рассмотренных структур обнаружено, что дисперсия угла  $\Delta\theta$  в структуре максимальна при распространении ПАВ в направлении, в котором максимален угол  $\Delta\theta$  на свободной поверхности кристалла. Как оказалось, дисперсия угла  $\Delta\theta$  может быть настолько велика, что возможно создание чисто акустического дефлектора на ПАВ [4], что представляет практический интерес.



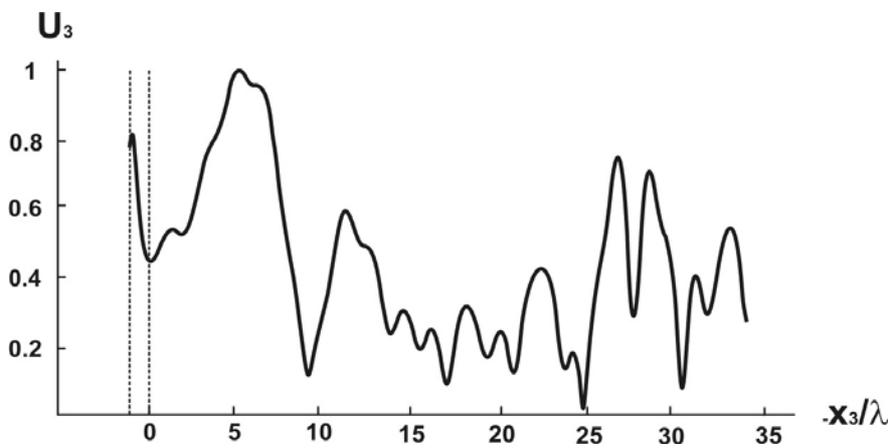
**Рис. 4** Частотные зависимости угла  $\Delta\theta$  в структуре AlN[001]/Сапфир[001] при углах  $\theta = 0$  (сплошной линией),  $\theta = 5^\circ$  (штриховой линией),  $\theta = 16^\circ$  (пунктиром). Толщина пленки AlN[001] 2 мкм.

В слоистых структурах ZnO[001]/Сапфир[001] и AlN[001]/Сапфир[001] на высоких частотах наблюдается уменьшение дисперсии угла  $\Delta\theta$  (рис. 4), то есть эффект фокусировки пучка ПАВ. Данный эффект выражен сильнее для больших толщин пленки. Практический интерес представляет возможность использования этого эффекта для снижения дифракционного расхождения и, следовательно, потерь сигнала на высоких частотах при конструировании широкополосных приборов на ПАВ на основе слоистых структур.



**Рис. 5** Зависимости действительной части поверхностного потенциала для структуры АИГ[001] с ориентированной по оси симметрии пленкой AlN на частоте 2 ГГц от расстояния до источника (в длинах волн).

Также в данной главе для снижения потерь на распространение и повышения диапазона частот устройств на приповерхностных акустических волнах поперечного типа было предложено использовать слоистую структуру "пьезоэлектрическая пленка - кристалл алюмоиттриевого граната (АИГ) с редкоземельными примесями", для которого известен эффект аномального снижения затухания поперечных объемных акустических волн (ОАВ) при введении в кристалл небольшого количества редкоземельных примесей. Данный эффект имеет чисто квантовую природу.



**Рис. 6** Зависимость амплитуды упругих смещений для структуры АИГ[001] с ориентированной по оси симметрии пленкой AlN на частоте 2 ГГц вглубь кристалла и по толщине пленки (в длинах волн) на расстоянии 25 длин волн от источника.

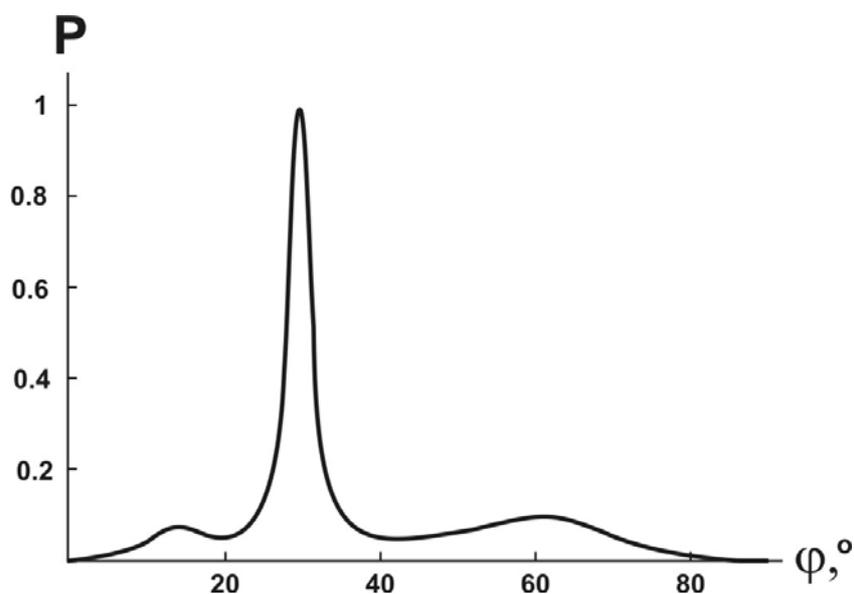
Методом функции Грина показано, что для структуры АИГ[001] с нанесенной на его поверхность тонкой пьезоэлектрической пленкой AlN возможно распространение сдвиговой ПОАВ (SV-волны), имеющей низкое дифракционное затухание (рис. 5), с преимущественной концентрацией упругой энергии не в пленке, а в кристалле (рис. 6). Практический интерес представляет возможность реализации такого процесса в приборах, позволяющая достичь аномально низкого затухания сигнала и расширить диапазон работы изготавливаемых по планарной технологии акустоэлектронных устройств, осуществляющих указанные функции обработки сигналов сложной формы и спектра.

**Глава 3** посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию возбуждения мод Лэмба в пластине с помощью клиновидного преобразователя ОАВ и решению на этой основе проблемы надежного обнаружения микро- и нанотрещин в листовом стекле.

Показывается недостаточность существующих методов теоретического анализа возбуждения волн Лэмба клиновидным преобразователем ОАВ и приводится метод точного решения полевой задачи возбуждения акустического поля клиновидным ультразвуковым преобразователем.

Проведено исследование эффективности возбуждения чистой моды волн Лэмба клиновидным преобразователем.

Рассчитаны угловые зависимости потока энергии акустического поля, возбуждаемого клином (рис. 7). Возбуждаемое акустическое поле является суперпозицией полей всех возбуждаемых мод Лэмба. Обнаружено, что акустический синхронизм волны Лэмба и продольной ОАВ в клине и максимум потока энергии акустического поля в пластине кронгласа толщиной 4 мм, возбуждаемого клином из оргстекла, на частоте 500 кГц имеют место при разных углах клина. Это отличие обусловлено тем, что при данных условиях невозможно возбуждение чистой моды Лэмба. Поэтому различие углов говорит о значительной амплитуде возбуждения мод, являющихся паразитными для работы системы обнаружения микро- и нанотрещин.

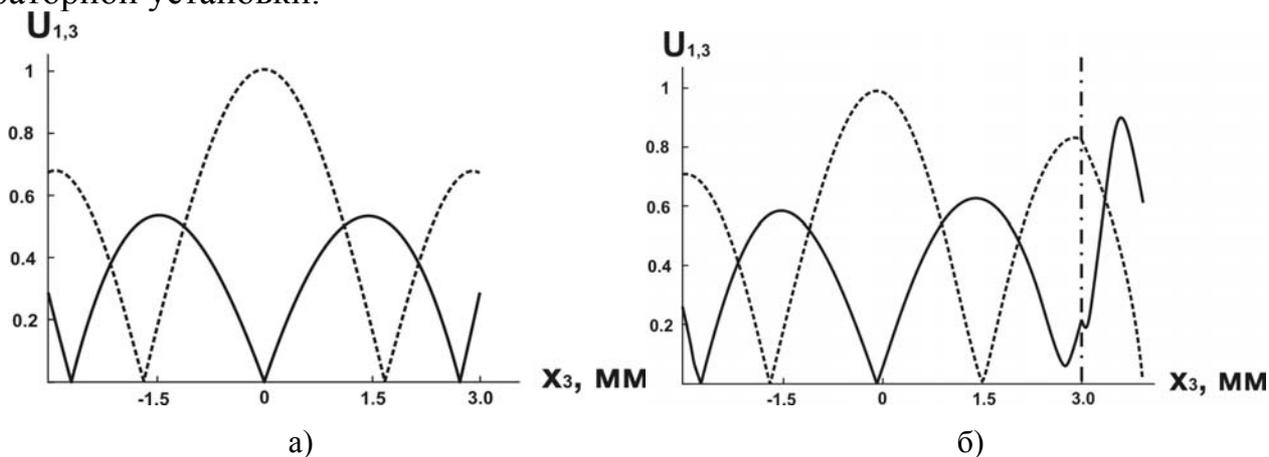


**Рис. 7** Зависимость потока энергии акустического поля в пластине кронгласа толщиной 4 мм, возбуждаемого клином из оргстекла на частоте 500 кГц от угла клина  $\varphi$ .

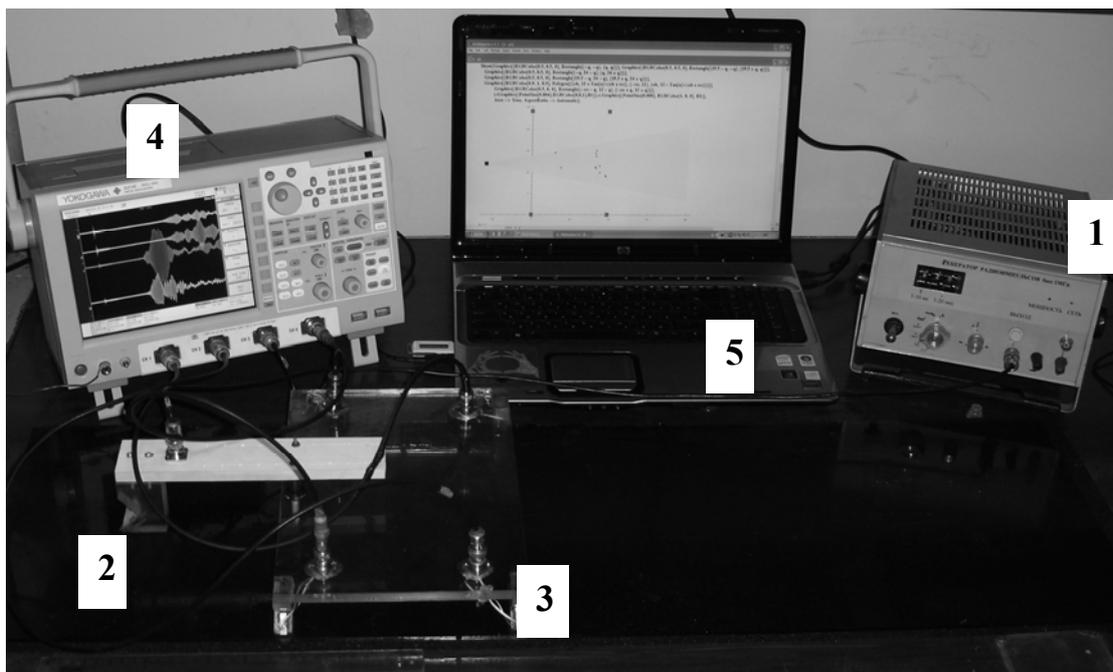
Возбуждение нескольких мод также подтверждается и различием в распределении амплитуды упругих смещений волн Лэмба и возбуждаемого клином акустического поля по толщине пластины.

Исследованы частотные зависимости потока энергии акустического поля, возбуждаемого клином при разных углах. Как показали расчеты, в пластине кронгласа нет преимущественного возбуждения одной моды низшего типа. Это

связано с тем, что амплитуды волн Лэмба низших типов, возбуждаемых даже при сильном нарушении условия акустического синхронизма, значительны вследствие их низкой фазовой скорости, при этом их угловые характеристики «сливаются». Поэтому необходимо искать условия возбуждения чистой моды высшего типа. Они были найдены для моды Лэмба первого высшего типа с требуемым для дефектоскопии распределением ультразвуковой энергии по сечению пластины (рис. 8). Экспериментальное исследование подтвердило данные расчета о том, что на частоте около 1 МГц в пластине кронгласа толщиной 6 мм клином из оргстекла с углом  $\varphi=40^\circ$  эффективно возбуждается чистая волна Лэмба первого высшего типа, что и было использовано при создании лабораторной установки.

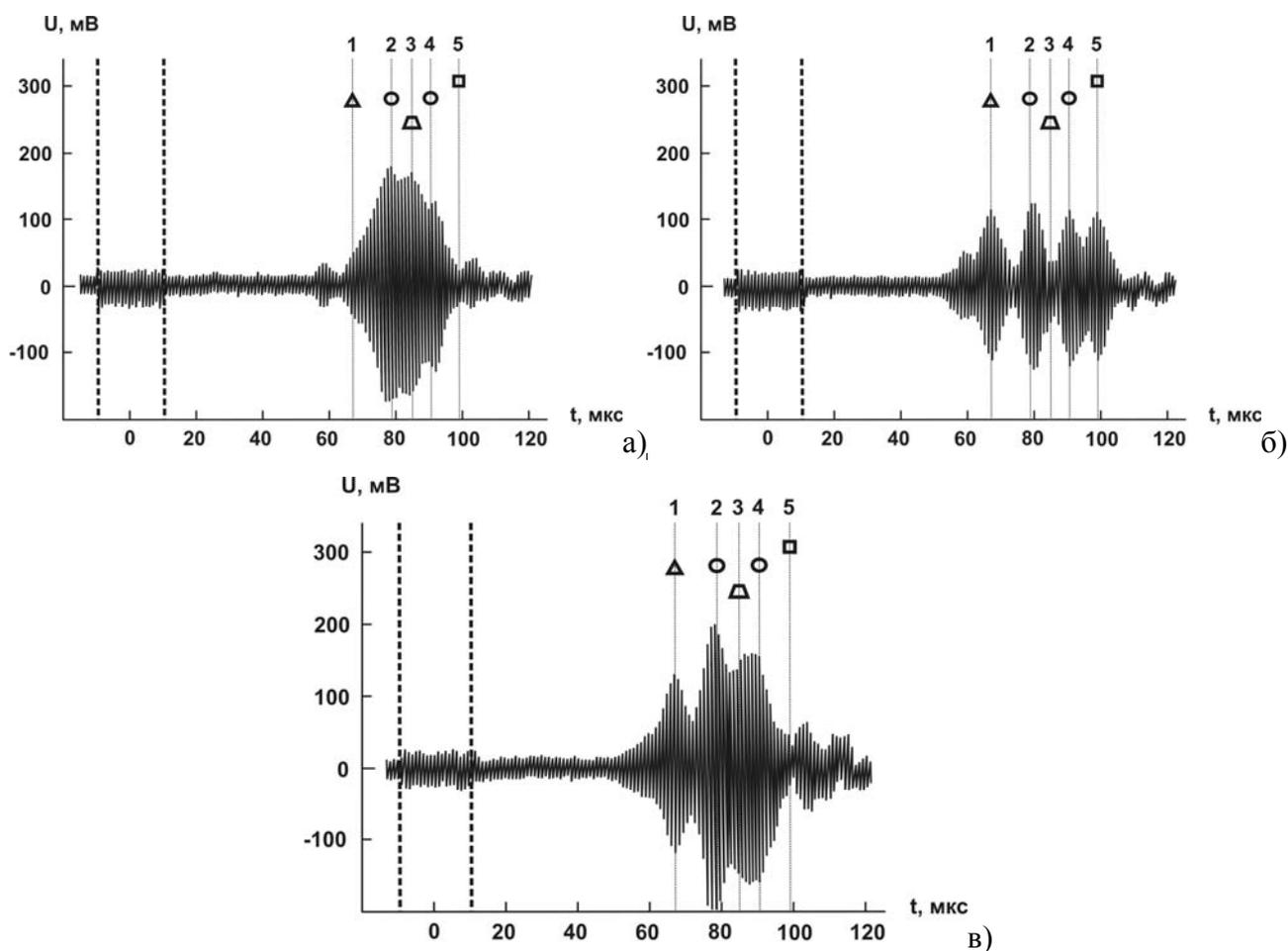


**Рис. 8** Сравнение распределения амплитуд упругих смещений (а) антисимметричной моды Лэмба первого высшего типа (сплошной линией –  $u_1$ , штриховой линией –  $u_3$ ) в свободной пластине кронгласа толщиной 6 мм на частоте 933.9 кГц, (б) упругих смещений акустического поля, возбуждаемого клином из оргстекла при угле  $\varphi=40^\circ$ . Граница раздела пластины и клина показана пунктиром.



**Рис. 9** Лабораторный макет устройства обнаружения микро- и нанотрещин в листовом стекле.

На основе разработанного научным руководителем диссертации способа обнаружения локальных дефектов, а также микро- и нанотрещин в листовом стекле [6] был рассчитан и создан лабораторный макет системы ультразвуковой диагностики трещиноватости листового стекла, пригодный для выходного контроля качества листового стекла в заводских условиях (рис. 9). Макет включает в себя генератор радиоимпульсов ультразвуковых частот 1, излучатель ультразвуковых волн 2, четыре приемных датчика- преобразователя 3, цифровой осциллограф 4, играющий роль блока управления и обработки, отображающий временную развертку излучаемых и принятых сигналов, способный конвертировать полученный аналоговый сигнал с системы датчиков в цифровой сигнал, компьютер с программным комплексом 5, обрабатывающим цифровой сигнал с осциллографа и формирующий изображения микро- и нанотрещин в исследуемом образце.



**Рис. 10** Осциллограммы сигналов с одного из ультразвуковых приемников а) до приложения механической нагрузки к пластине листового стекла, б) при приложении нагрузки, в) после снятия нагрузки.

Проведено исследование влияния внешней механической нагрузки на образование нанотрещин. Обнаружено, что нанотрещины могут спонтанно рождаться и исчезать при приложении и снятии механической нагрузки. Так, импульсы 1 и 5 (рис. 10) появились при приложении нагрузки, но импульс 1 остался при ее снятии, а импульс 5 – исчез. По-видимому, нанотрещина «за-

крепляется», если она встречается с каким-либо постоянным дефектом. По аналогии с явлением закрепления вихрей Абрикосова в сверхпроводниках на неоднородностях это явление можно назвать *пиннинг*ом нанотрещин [7]. В этом случае при дальнейших нагрузках такая трещина может только расти. Этот факт предоставляет уникальную возможность обнаружения не только нанотрещин, но и различного рода скрытых дефектов в листовом стекле. Практическое значение этого явления состоит в том, что контроль наличия нанотрещин нужно проводить при знакопеременных механических напряжениях, что значительно повышает надежность изделий из закаленного листового стекла.

На созданной лабораторной установке было получено распределение трещин по площади пластины закаленного стекла, изготовленного на конвейерной линии Саратовского института стекла (рис. 11).

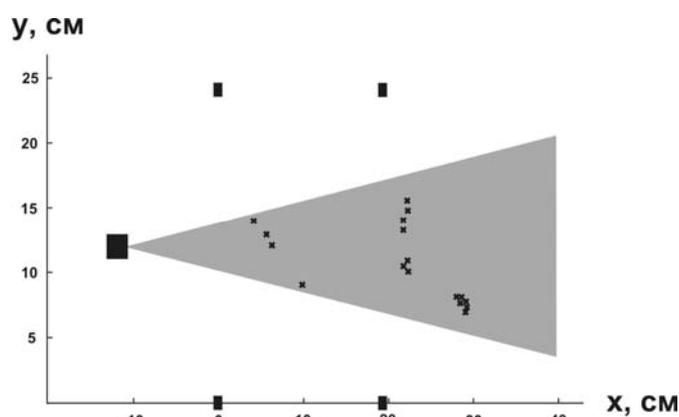


Рис. 11 Изображение расположения рассеивающих центров.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

В результате проведенной работы цель, сформулированная в начале работы и определившая направление и методы исследования, достигнута.

Основываясь на достоверности используемых расчетов, были проведены исследования и получены следующие **новые результаты**:

- проведено теоретическое исследование влияния вращения на фазовые характеристики ПАВ в неинерциальных системах отсчета и найдены способы его снижения;
- проведено теоретическое исследование дисперсии угла отклонения ПАВ в структурах с пьезоэлектрическим слоем. Найдены условия, при которых величина угла отклонения потока энергии ПАВ в данных структурах достигает десятков градусов, что предоставляет возможность разработки интегрального акустического дефлектора;
- проведено теоретическое исследование приповерхностных акустических волн в структуре AlN/АИГ. Показана возможность снижения потерь на распространение в данной структуре, что позволит повысить диапазон частот акустоэлектронных устройств обработки сигналов;
- строго решена задача возбуждения волн Лэмба в пластине с помощью клиновидного преобразователя объемной акустической волны, определены наилуч-

ших угловые и частотные характеристики системы возбуждения волн Лэмба, создана лабораторная установка и экспериментально исследовано рассеяние волн Лэмба на микро- и нанотрещинах и дефектах в листовом стекле. Исследована динамика образования нанотрещин под нагрузкой. Обнаружено, что нанотрещины в листовом стекле могут рождаться при приложении нагрузки и исчезать или оставаться при ее снятии. Это позволит исследовать наличие скрытых дефектов в листовом стекле.

### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Kosinsky J. A. Theory and Design of Piezoelectric Resonators Immune to Acceleration: Present State of the Art / J. A. Kosinsky, R. A. Pastore // IEEE Tr. UFFC. – 2001. - V. 48 - No. 5 - P. 1343 - 1347.
2. Fang H. Y. Surface Acoustic Waves Propagating over a Rotating Piezoelectric Half-Space / H. Y. Fang, J. S. Yang, Q. Jiang // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect., Freq. Contr. – 2001. - V. 48. - № 4. - P. 998 – 1004.
3. Сучков С. Г. Влияние слоистой структуры электродов на характеристики устройств на ПАВ / С. Г. Сучков, Д. С. Чайковский // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика, 2007. Т. 7. № 1. С. 26-31.
4. Пат. 2340909 RU, МКлб G 01 R 23/16. Акустический измеритель частоты радиосигналов / С. Г. Сучков, Д. С. Сучков, Н. Л. Сучкова / - № 2007122090/28, заявлено 2007.13.06., опубл. 2008.10.12.
5. Ахметов С.А. Затухание ультразвука в легированных кристаллах алюмоиттриевого граната и алюмомагниево-шпинели / С. А. Ахметов, Г. А. Гагизова, С. Н. Иванов // ФТТ. 1977. Т. 19. - С. 308-309.
6. Пат. 2390770 RU, МКлб G 01 N 29/04. Способ ультразвукового контроля микродефектов в листовом стекле / А.Б.Жималов, С.Г.Сучков, А.В.Селифонов, Д.С.Сучков / - № 2009109128/28, заявлено 2009.13.03., опубл. 2010.27.05.
7. Tinkham M. Introduction to Superconductivity / M. Tinkham // McGraw-Hill, New York, 1975.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Сучков С. Г. Влияние вращения на девиацию фазы в устройствах на поверхностных акустических волнах / С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев, С. А. Никитов // **Радиотехника и электроника**, 2011. Т. 56, N 8., С. 1014 - 1016.
2. Селифонов А. В. Ультразвуковое устройство для обнаружения микро- и нанотрещин в листовом стекле для прогнозирования его разрушения / А. В. Селифонов, С. Г. Сучков, Д. С. Сучков, В. А. Николаевцев, А. Б. Жималов, И. Н. Горина // **Academia. Архитектура и строительство**, 2010. N 3., С. 618 – 622.

3. Жималов А. Б. Инновационный неразрушающий метод ультразвукового контроля нано- и микротрещин и дефектов в листовом стекле / А. Б. Жималов, И. Н. Горина, С. Г. Сучков, А. В. Селифонов, Д. С. Сучков, В. А. Николаевцев // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 10. Инновационная деятельность. Волгоград, 2009-2010, Вып. 4., С. 52 - 58.
4. Suchkov S. G. Phase Velocity Deviation in Surface Acoustic Wave Devices under Rotation / S. G. Suchkov, V. A. Nikolaevtsev // FORUM ACUSTICUM 2011 27 June - 1 July, Aalborg, Denmark, P. 2811 - 2813.
5. Suchkov D. S. Ultrasonic Research of Nanocracks Creation and Annihilation in Plates under Stress / D. S. Suchkov, V. A. Nikolaevtsev, A. V. Selifonov, S. G. Suchkov // FORUM ACUSTICUM 2011 27 June - 1 July, Aalborg, Denmark, P. 2815 – 2817.
6. Сучков С. Г. О возможности создания акустического гироскопа на поверхностных акустических волнах / С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев, В. П. Камишкерцев, А. А. Сергеев // В. сб. «Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства. Технология. Материалы» Вып. 3, Изд-во Саратовского университета, 2009, С. 104 - 107.
7. Сучков С. Г. Девиация фазовой скорости поверхностной акустической волны при вращении / С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев // XXIV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН, 12-15 сентября 2011, Саратов, т. 1, С. 249 – 251.
8. Сучков Д. С. Ультразвуковое исследование рождения и уничтожения нанотрещин в пластинах под нагрузкой/ Д. С. Сучков, В. А. Николаевцев, А. В. Селифонов, С. Г. Сучков // XXIV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН, 12-15 сентября 2011, Саратов, т. 2, С. 80 – 82.
9. Сучков С. Г. Девиация фазы в устройствах на поверхностных акустических волнах при вращении / С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев // В сб. VII Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения А.С.Попова «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара, 2008, С. 27 - 28
10. Николаевцев В. А. Акустический гироскоп на поверхностных акустических волнах / В. А. Николаевцев // В сб. «Всероссийская молодежная выставка-конкурс прикладных исследований, изобретений и инноваций», Изд-во Саратовского университета, 2009, С. 27
11. Жималов А. Б. Ультразвуковое устройство для обнаружения микро- и нанотрещин и дефектов в листовом стекле / А. Б. Жималов, И. Н. Горина, С. Г. Сучков, А. В. Селифонов, Д. С. Сучков, В. А. Николаевцев // В сб. «Пятый Саратовский Салон изобретений, инноваций и инвестиций» в 2 ч.- Саратов, часть 1, Изд-во СГТУ, 2010, С. 55 - 56
12. Сучков С. Г. Приповерхностная акустическая волна в структуре AlN/АИГ / С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев, Д. С. Сучков, С. А. Никитов // принята к докладу на конференции XXV сессия Российского акустического обще-

ства, Сессия Научного совета по акустике РАН, 17-20 сентября 2012, Таганрог.

13. Сучков С. Г. Дисперсия угла отклонения потока энергии поверхностных акустических волн в слоистых структурах / С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев, Д. С. Сучков, С. А. Никитов // принята к докладу на конференции XXV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН, 17-20 сентября 2012, Таганрог