

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.055.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ИМ. Л.В. КИРЕНСКОГО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФ СО РАН), ФАНО, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 13 мая 2016 г. № 3

О присуждении Буркову Сергею Ивановичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Влияние внешних статических воздействий на распространение упругих волн в пьезокристаллах и слоистых структурах» по специальности 01.04.03 – радиофизика принята к защите 21 января 2016 г. протокол № 2 диссертационным советом Д003.055.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН), ФАНО. 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, строение 38, приказ Минобрнауки России №714/НК от 2 ноября 2012 г.

Соискатель Бурков Сергей Иванович 1958 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Влияние постоянного электрического поля на распространение упругих волн в пьезокристаллах» защитил 1990 году в диссертационном совете, созданном на базе Института физики им. Киренского Л. В. СО АН СССР. Работает доцентом в Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ). Диссертация выполнена на кафедре «Физики твердого тела и нанотехнологий» СФУ. С 1.12.2010 по 1.12.2013 был прикреплен к докторантуре СФУ.

Научный консультант, академик РАН РФ Александров Кирилл Сергеевич.

Официальные оппоненты: Зайцев Борис Давыдович – д.ф.-м.н., проф., Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, зав. лабораторией «Физическая акустика»; Даринский Александр Николаевич – д.ф.-м.н., в.н.с., Институт кристаллографии им. Шубникова РАН; Аплеснин Сергей Сте-

панович – д.ф.-м.н., проф., зав. каф. физики ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. ак. М. Ф. Решетнева» – дали положительные отзывы.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов» (ТИСНУМ), г. Москва, г. о. Троицк, в своем положительном отзыве, подписанным Буга Сергеем Геннадьевичем, д.ф.-м.н., зав. лабораторией, указала, что Бурков Сергей Иванович в своей диссертационной работе исследовал влияние статических воздействий на отражение и преломление ОАВ от границы раздела двух сред. Приведена классификация видов взаимодействия мод упругих волн. Впервые выполнен анализ влияния внешнего электрического поля на гибридизацию акустических мод в пластине пьезоэлектрического кристалла и в слоистой пьезоструктуре. Выполнен анализ значимости вклада физической и геометрической нелинейности в изменение характеристик упругой волны вследствие воздействия одноосного механического напряжения. Создан оригинальный программный комплекс, что делает диссертационную работу особенно ценной для экспериментаторов. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для физической акустики, радиофизики, акустоэлектроники и пьезотехники.

Соискатель имеет 60 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 31 статья, из которых 22 опубликованы в рецензируемых журналах. Они представляют большую научную ценность, поскольку излагают теорию распространения упругих волн в однородно-деформированной пьезоэлектрической среде и хорошо известны научной общественности. Наиболее значительные работы:

1. 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.
2. Burkov S. I., Sorokin B. P., Karpovich A. A., Alexandrov 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.
3. 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. 4. 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. 5. 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. 6. 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. 7. 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. 8. 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. 9. 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. 10. 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. 11. 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. 12. 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 « $\text{Me}_1/\text{AlN}/\text{Me}_2/(100)$ алмаз» //Акустический Журнал. – 2015. – Т. 61, № 4. – С. 464–476. 13. 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. Общий объем 27 усл. печ. л.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Ведущая организация – отзыв положительный. Замечания: 1. Непоследовательное употребление терминов «одноосное механическое давление» и «одноосное механическое напряжение». 2. В различных главах одна и та же величина, например модуль электрического поля, обозначается по-разному. 3. Представляется избыточной приводимая точность расчётных значений фазовых скоростей и коэффициентов управляемости (до 8 или 6 значащих цифр). 4. Непонятно, почему в последовательно расположенных соотношениях координатные индексы обозначены либо заглавными латинскими либо строчными буквами? *Зайцев Б.Д. (оппонент)* – отзыв положительный. Замечания: 1. Как для объемных волн, так и для поверхностных (также в решении задачи о преломлении и отражении волн от границы раздела) в выражениях для компонент тензора Кристоффеля были оставлены только члены, пропорциональные первой степени напряженности поля. Это непонятно, поскольку известны экспериментальные работы по влиянию электрического поля на скорость ПАВ и ОАВ в ниобате лития, и там зависимости изменения скорости от напряженности поля нелинейные. 2. Не очень понятно описан алгоритм расчета характеристик поверхностных волн. 3. Не совсем понятно, как удалось обойтись без граничного условия непрерывности электрического потенциала на границе раздела кристалл – вакуум при наличии граничного условия непрерывности нормальной компоненты электрической индукции. 4. Нигде не сказано, насколько сильно меняются коэффициенты и углы отражения и преломления при приложении поля. *Даринский А.Н. (оппонент)* – отзыв положительный. Замечания: 1. Утверждение о возможности управления распространением волны по принципу «вкл/выкл» недостаточно обосновано; дополнительно следовало бы вычислять функцию Грина. 2. В тексте диссертации используются разные обозначения угловых градусов, например, на стр. 53. На стр. 119 отмечается, что электрическое поле вызывает «...экспоненциальное поведение коэффициентов управляемости», но непонятно, откуда берется экспонента; по-видимому, подразумевается степенная зависимость. В

целом, диссертационная работа производит положительное впечатление и является законченным научно-исследовательским трудом. Аплеснин С.С (*оппонент*) – отзыв положительный. Замечания: 1. На стр. 97 утверждается, что понижение симметрии происходит только за счет нелинейного пьезоэффекта и электрострикции и отсутствует статическая деформация кристалла. Как это понимать, электрострикция связана с деформацией? 2. На стр. 101 вычисляются температурные коэффициенты задержки, куда входит эффективный коэффициент линейного теплового расширения. Что значит эффективный и откуда взяты эти величины? 3. Спектр собственных значений и векторов вычислялись из минимума функционала. В этом случае присутствуют локальные минимумы. Каким образом и на основании какого критерия эти решения отбрасывались? 4. На рис. 6.2 представлены расчетные данные и экспериментальные точки из работы [291] и различие в численных значениях объясняется относительным изменением длины звукопровода. Однако численных значений этого изменения не приводится. Одним из граничных условий в уравнениях (5.2) указано непрерывность волны потенциала на границе кристалл – вакуум, но в уравнении (5.11) оно опущено без каких-либо объяснений.

Отзывы не автореферат: *Д.ф.-м.н. Кузнецова И.Е., д.ф.-м.н. Анисимкин В.И.* – отзыв положительный. Замечания: 1. В граничных условиях (11) отсутствует условие на непрерывность электрического потенциала на границе пьезокристалла с вакуумом. 2. При расчете температурных характеристик акустических волн Лэмба, обладающих дисперсией, не учтен вклад температурных изменений скорости из-за температурных изменений толщины пластины. 3. При оптимизации кристаллографических срезов для акустических волн в слоистых структурах необоснованно исключен такой важный параметр, как их температурная стабильность (с. 27). 4. Гл. 7 представляется избыточной, т. к. разработанная программа расчета не является официально зарегистрированным программным продуктом (или в автореферате этого не указано). *К.ф.-м.н. Атучин В.В., д.ф.-м.н. Царев А.В.* – отзыв положительный. Замечания: 1. Не дается определение «коэффициента гибридизации». 2. В гл. 1 и последующих главах представлены расчеты для кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, LiNbO_3 , алмаза и лангасита, однако использованные материальные константы не указаны. В гл. 2 обсуждается

снятие вырождения (акустическая ось). К сожалению, не обсуждается, как величина этого эффекта зависит от величины электрического поля? 4. В гл. 5 показано, что под воздействием внешнего электрического поля и при соответствующем подборе материалов слоя и подложки можно управлять распространением моды упругой волны в слоистой структуре по принципу «вкл/выкл». Однако, не показано к каким экспериментально наблюдаемым эффектам это может привести? 5. В автореферате мы не нашли сравнительного анализа результатов автора с аналогичными результатами других исследователей. *Д.ф.-м.н. Сахненко В.П., к.ф.-м.н. Радченко Г.С.* – отзыв положительный. Замечания: 1. Не описаны основные параметры, используемые в полученных дисперсионных соотношениях. Из чтения автореферата остаются неясными критерии применимости модели к конкретным симметриям. 2. В автореферате практически отсутствует список используемой литературы. 3. В выражениях (7–10) и некоторых других формулах математические обозначения не описаны. 4. Следовало более точно определить, что автор подразумевает под коэффициентом электромеханической связи на стр. 32 автореферата. *Д.т.н., проф. Заграй Н.П.* – отзыв положительный. Замечания: 1. В представленных в автореферате экспериментальных результатах на рис.1 и рис.5 даны ссылки на неавторские работы. 2. В автореферате в разделе «Научная новизна и значимость результатов» неудачно сформулирован текст. 3. В приводимом перечне публикаций отсутствуют публикации лично автора (без соавторов). *Д.т.н., проф. Тимошенко В.И., к.т.н., доцент Сластен М.И.* – отзыв положительный. Замечания: 1. Отсутствует описание используемых обозначений в некоторых уравнениях, приведенных в автореферате. 2. На рис. 1 автореферата приведены экспериментальные значения, однако отсутствует ссылка на статью, из которой они использовались. 3. В автореферате отсутствует список зарегистрированных программ, используемых в работе. *Д.ф.-м.н. Глушков Е.В., к.ф.-м.н. Голуб М.В.* – отзыв положительный, замечаний нет. *Д.ф.-м.н. Захаров Ю.В.* – отзыв положительный, замечаний нет. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован тем, что они являются общепризнанными специалистами в радиофизике и физике конденсированного состояния вещества, физике волновых процессов и кристаллоакустике.

Диссертационный совет отмечает, что соискателем выполнено комплексное исследование характеристик акустических волн в объемных пьезокристаллах, в пьезоэлектрических пластинах, слоистых пьезоструктурах, подвергнутых внешнему воздействию статического электрического поля или одноосного механического напряжения:

1. Выполнен анализ влияния внешнего однородного электрического поля и одноосного механического давления на основные характеристики и типы упругих волн в пьезокристаллах силикосилленита, ниобата лития, лангасита и алмаза при различных направлениях приложения внешнего воздействия.

2. Исследовано влияние внешних статических воздействий на отражение и преломление ОАВ на границе раздела «кристалл – вакуум» и от границы раздела двух пьезокристаллов при различных типах падающей волны.

3. Выполнен анализ влияния внешнего электрического поля на характеристики волны Лэмба и *SH*-волны и на взаимодействие (гибридизацию) мод акустической волны в пластине пьезокристалла. Установлен характер смены типа взаимодействующих мод в области гибридизации при воздействии внешнего электрического поля.

4. Выполнен анализ изменения дисперсионных зависимостей фазовых скоростей, углов 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».

5. Продемонстрировано, что воздействие внешнего электрического поля или одноосного механического давления вследствие изменения эффективной симметрии кристалла может приводить к трансформации ОАВ в упругую волну поверхностного типа. Выполнен анализ вклада физической и геометрической нелинейности в статическую деформацию в слое и изменение характеристик упругой волны, возникающих вследствие воздействия внешнего механического давления на слоистую пьезоструктуру.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: получило дальнейшее развитие теория 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. Изучены особенности распространения объемных и поверхностных акустических волн, возникающие вследствие изменения упругой симметрии при внешних статических воздействиях в окрестности акустической оси, а также характер трансформации акустических осей. Выполнено исследование влияния внешних статических воздействий на характеристики упругих волн, распространяющихся в пьезоэлектрической пластине либо в слоистой пьезокристаллической структуре. Данные исследования являются необходимым шагом для создания моделей управляемых акустоэлектронных сенсоров и составных акустических резонаторов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что 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. Представлен анализ температурных зависимостей характеристик упругой волны в пластине кристалла лангасита в базовых и повернутых срезах. Выполнен анализ возможности компенсации температурных флуктуаций фазовых скоростей упругой волны приложением внешнего электрического поля, что может представлять особый интерес для создания высокостабильных устройств акустоэлектроники. Установлены наиболее перспективные срезы и направления распространения акустической волны в пьезоэлектрических слоистых структурах для создания акустоэлектронных устройств. Продемонстрирована принципиальная возможность управлять распространением моды упругой волны в слоистой структуре по принципу «вкл/выкл» приложением внешнего электрического поля к структуре. Создан программный комплекс,

позволяющий рассчитать характеристики упругих волн различных типов в монокристалле, в пластине пьезоэлектрика и многослойной пьезоэлектрической системе. Достоверность результатов исследования определяется корректностью постановки граничных условий, использованием точных вычислительных методов, а также количественным и качественным соответствием полученных в работе теоретических результатов с экспериментальными данными других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в том, что он лично принимал участие в постановке задач, разработке моделей и методов их решения, анализе и интерпретации полученных результатов. Основная часть численных расчётов, а также разработка и тестирование программ, выполнены им лично или при его непосредственном участии. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим для статей, включенных в диссертацию. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, и принято решение присудить Буркову Сергею Ивановичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них по профилю рассматриваемой диссертации (01.04.03 – радиофизика) 5 докторов наук, участвующих в заседании, 7 докторов наук по специальности 01.04.05 –оптика, 5 докторов наук по специальности 01.04.01 –приборы и методы экспериментальной физики из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. председателя диссертационного совета Д003.055.01
д.ф.-м.н., профессор

Волков Н.В.

Ученый секретарь диссертаци
д.ф.-м.н., с.н.с

Д003.055.01

Втюрин А.Н.

