

Отзыв

официального оппонента

профессора, д.ф.-м.н. Зайцева Бориса Давыдовича на диссертацию
Буркова Сергея Ивановича " Влияние внешних статических воздействий на распространение упругих волн в пьезокристаллах и слоистых структурах ", представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Диссертационная работа Буркова С.И. посвящена решению актуальной крупной научной задачи, заключающейся в исследовании влияния внешних статических воздействий на характеристики акустических волн самых различных типов в пьезоэлектрических материалах и структурах. Результаты решения этой задачи помимо фундаментального значения имеют еще и интересные практические приложения. В качестве внешних воздействий рассматривались однородное электрическое поле и одноосное механическое давление. Следует отметить, что интерес к подобным задачам появился еще в 80 годах прошлого столетия. Вначале анализ внешнего электрического поля на характеристики акустических волн проводился в простейшем случае - в предположении механически зажатого кристалла. Рассматривались как пьезоэлектрические кристаллы, так и центросимметричные, и не делалось никакого различия между механическим и термодинамическим напряжением. Однако такое предположение оказалось далеким от реальности, поскольку осуществить условие механически зажатого кристалла на практике чрезвычайно трудно. Затем сотрудники Красноярского института физики впервые вывели уравнения для механически свободного кристалла, находящегося во внешнем электрическом поле, и изучили его влияние на характеристики волн в ряде кристаллов, нелинейные константы которых были известны в то время. Со временем круг таких материалов существенно расширился и исследования С.И. Буркова являются логическим продолжением этой работы.

В первой главе проанализировано влияние внешнего электрического поля и одноосного механического давления на характеристики объемных и поверхностных акустических волн в нелинейных пьезоэлектрических кристаллах. Приведены основные термодинамические уравнения кристалла при указанных внешних воздействиях и уравнение движения и уравнение Лапласа в исходной недеформированной системе координат, а также уравнения состояния. Показано, что материальные постоянные являются сложными функциями напряженности внешнего поля или одноосного давления. Получено уравнение Кристоффеля, решение которого для ряда кристаллографических ориентаций в кристаллах силиката висмута, лангасита и алмаза позволило выявить особенности влияния внешних воздействий на фазовую скорость и скорость переноса энергии объемных волн и на их структуру, а также поведение акустических осей. Исследовалось также влияние внешних воздействий на характеристики поверхностных акустических волн. Показано хорошее соответствие полученных теоретических результатов известным экспериментальным данным. В результате было получено огромное количество расчетного материала, который приведен в приложении, и имеет несомненную практическую и фундаментальную ценность.

К замечаниям по первой главе можно отнести следующее.

Во-первых, как для объемных волн, так и для поверхностных в выражениях для компонент тензора Кристоффеля были оставлены только члены, пропорциональные первой степени напряженности поля. Это непонятно, поскольку, во-первых, используемые поля имеют громадную напряженность (~ 100 МВ/м) и, во-вторых, известны экспериментальные работы по влиянию электрического поля на скорость ПАВ и ОАВ в ниобате лития, в которых зависимости изменения скорости от напряженности поля нелинейные. Точно также в выражениях для скорости переноса энергии были удалены квадратичные и кубические по полю слагаемые без какой-либо оценки их величины.

Во-вторых, не очень понятно описан алгоритм расчета характеристик поверхностных акустических волн, хотя используется апробированная методика поиска решения в виде плоских неоднородных волн.

И, в- третьих, 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.

Во второй главе проанализировано влияние внешнего электрического поля на отражение объемных акустических волн от границы раздела «пьезоэлектрический кристалл – вакуум». В качестве падающей волны рассматривались все три типа объемных волн и определялись коэффициенты отражения всех волн в зависимости от угла падения. Показано, что приложение электрического поля вследствие понижения симметрии кристалла приводит к увеличению числа типов отраженных волн и меняет коэффициенты отражения. Рассмотрено также отражение и преломление акустических волн на границе раздела двух кристаллических сред. Показано, что и в этом случае приложение внешнего поля приводит к увеличению числа типов отраженных и преломленных волн.

К замечаниям по второй главе можно отнести следующее.

Во- первых, в решении задачи о преломлении и отражении волн от границы раздела автор также пренебрегает квадратичными и кубичными членами по полю без какого либо их сравнения с линейными слагаемыми.

Во-вторых, на стр. 36 записано, что для электрических величин граничными условиями на границе «кристалл -вакуум» являются непрерывность нормальной компоненты электрической индукции и выполнение уравнения Лапласа для вакуума вместо непрерывности электрического потенциала.

В-третьих, нигде не сказано насколько сильно меняются коэффициенты и углы отражения и преломления при приложении поля.

В третьей главе проанализировано влияние внешнего одноосного давления на отражение объемных акустических волн от границы раздела «пьезоэлектрический кристалл – вакуум». В качестве падающей волны рассматривались все три типа объемных волн и определялись коэффициенты отражения всех волн в зависимости от угла падения. Впервые сформулировано уточненное механическое граничное условие для этого случая. Показано, что приложение одноосного давления вследствие понижения симметрии кристалла приводит к увеличению числа типов отраженных волн. Рассмотрено также отражение и преломление акустических волн на границе раздела двух кристаллических сред. Показано, что и в этом случае приложение одноосного давления приводит к увеличению числа типов отраженных и преломленных волн. Обнаружено, что одноосное давление приводит к более существенному изменению коэффициентов отражения по сравнению с коэффициентами преломления.

К замечаниям по третьей главе можно отнести следующее.

Во- первых, в решении задачи о преломлении и отражении волн от границы раздела автор традиционно пренебрегает квадратичными и кубичными членами приложенного давления без какого либо их сравнения с линейными слагаемыми.

Во-вторых, на стр. 66 также традиционно записано, что для электрических величин граничными условиями на границе «кристалл -вакуум» являются непрерывность нормальной компоненты электрической индукции и выполнение уравнения Лапласа для вакуума вместо непрерывности электрического потенциала.

В-третьих, нигде не сказано насколько сильно меняются коэффициенты и углы отражения и преломления при приложении давления.

В четвертой главе проанализировано влияние внешнего электрического поля на характеристики акустических волн в пьезоэлектрических пластинах. Впервые исследовались такие материалы как германат висмута и лангасит. Исследовалось влияние внешнего

электрического поля на дисперсию ряда волн Лэмба и волн с поперечно – горизонтальной поляризацией низших порядков для наиболее главных кристаллографических ориентаций. В результате найдены наиболее оптимальные кристаллографические ориентации для всех рассмотренных волн, которые, по мнению автора, могут быть использованы для создания электрически управляемых устройств. Определены также кристаллографические ориентации в лангасите, характеризующиеся низким значением температурного коэффициента задержки, что весьма важно при разработке температурно – стабильных акустических устройств. Впервые детально проанализировано влияние электрического поля на характер гибридизации волн в пластинах. Показано, что электрическое поле может снимать вырождение фазовых скоростей в области касания дисперсионных кривых и к изменению коэффициента гибридизации.

К замечанию по четвертой главе можно отнести следующее.

На стр. 81 записаны в самом общем виде 10 электрических и механических граничных условий в полном объеме. Однако подстановка решений в эти граничные условия привела к системе из 8 уравнений. Анализ показал, что не учтены условия непрерывности электрического потенциала на обеих сторонах пластины.

В пятой главе впервые проанализировано влияние внешнего электрического поля на характеристики акустических волн в структурах «полубезграничная подложка – тонкий упругий слой». В качестве подложки использовались такие материалы как германат висмута, плавленый кварц и ниобат лития. Материалом слоя служили плавленый кварц и лангасит. Исследовалось влияние внешнего электрического поля на дисперсию и структуру волн Лява и волн Рэлея в таких волноводах, а также на скорость переноса энергии и коэффициент электромеханической связи. В результате найдены наиболее оптимальные кристаллографические ориентации для всех рассмотренных волн, которые, по мнению автора, могут быть использованы для создания электрически управляемых устройств. Впервые обнаружена интересная ситуация в которой приложенное электрическое поле может приводить к невозможности распространения поверхностной волны в структуре. Показана возможность создания амплитудного модулятора акустической волны на этом принципе.

К замечаниям по пятой главе можно отнести следующее.

Во- первых, при записи эффективных материальных постоянных автор традиционно пренебрегает квадратичными и кубическими членами приложенного электрического поля без какого либо их сравнения с линейными слагаемыми.

Во – вторых, на стр. 111 записаны в самом общем виде 13 электрических и механических граничных условий в полном объеме. Однако подстановка решений в эти граничные условия привела к системе из 12 уравнений. Анализ показал, что не записаны условия непрерывности электрического потенциала на свободной границе слоя.

В шестой главе проанализировано влияние одноосного давления на характеристики акустических волн в «структурах полубезграничная подложка – тонкий упругий слой». В качестве подложки использовались такие материалы как германат висмута, плавленый кварц, ниобат лития и алмаз. Материалом слоя служили плавленый кварц, нитрид алюминия и лангасит. Исследовалось влияние одноосного давления на дисперсию и структуру волн Лява и волн Рэлея в таких волноводах. В результате найдены наиболее оптимальные кристаллографические ориентации для всех рассмотренных волн, которые, по мнению автора, могут быть использованы для создания акустических устройств, управляемых внешним давлением. Особое внимание было уделено очень перспективной структуре «нитрид алюминия - алмаз». Сделана оценка роли модулей упругости третьего порядка на характеристики акустических волн в рассматриваемых структурах при приложении внешнего давления.

К замечанию по шестой главе можно отнести следующее.

Во - первых, при записи эффективных материальных постоянных автор традиционно пренебрегает квадратичными и кубическими членами приложенного давления без какого либо их сравнения с линейными слагаемыми.

Во- вторых, на стр. 125 записаны в самом общем виде 13 электрических и механических граничных условий (6.2) в полном объеме. Однако подстановка решений в эти граничные условия привела к системе (6.4) из 11 уравнений. Кроме того, в этих уравнениях есть слагаемые, в которых некоторые индексы, по которым производится суммирование, встречаются три раза.

И наконец, в седьмой главе показана используемая нормировка компонент тензора Кристоффеля для получения хорошей его обусловленности. Приведен используемый автором комплекс программ.

Таким образом, изучение влияния электрического поля или внешнего давления на параметры рассмотренных типов акустических волн в различных материалах и структурах выполнено вполне корректно на высоком научно-техническом уровне. Полученные результаты открывают новые перспективы разработки малогабаритных акустических устройств обработки акустических сигналов с электрическим или механическим управлением. Автореферат диссертации полностью ей соответствует.

В целом, диссертационная работа Буркова С.И. представляет собой законченное научное исследование. Представленные в работе результаты, отличающиеся достаточной полнотой и высоким уровнем исполнения, свидетельствуют о высокой квалификации диссертанта и об его умении ставить новые интересные физические задачи, проводить анализ сложных физических объектов. Основные материалы диссертации достаточно апробированы в научной печати, а также широко представлены на Российских и Международных конференциях.

Завершая свой отзыв хочется отметить известность среди научной общественности результатов, полученных С.И. Бурковым, их опубликованность в периодической научной литературе и апробирование на научных конференциях различного уровня. Учитывая буквально огромный фактический материал проведенных исследований и представленных в диссертации, их новизну, научную значимость и полезность в большей их части (несмотря на сделанный мною в тексте этого отзыва ряд критических замечаний) считаю, что представленная работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор С.И. Бурков заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Отзыв составил Зайцев Борис Давыдович, зав. лабораторией Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов 410019, ул. Зеленая, д. 38; тел. +79173047418,
E-mail: zai-boris@yandex.ru.

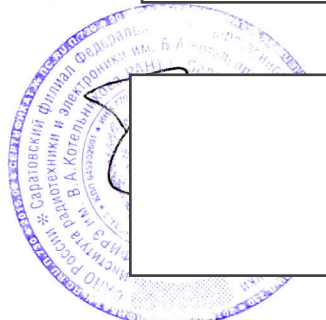
Зав. лабораторией Саратовского филиала
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, д.ф.-м.н., профессор

Подпись сотрудника Саратовского филиала
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
Зайцева Б.Д. заверяю
Директор СФ ИРЭ РАН, д.ф.-м.н.

15 апреля 2016 г.



Зайцев Б.Д.



Филимонов Ю.А.

Список основных публикаций Зайцева Б.Д.

Монографии:

1. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Shikhabudinov A.M. "Characterization of mechanical and electrical properties of nanocomposites", in *Polymer Composites*, ed.by Thomas et.al, Wiley-VCH, Germany, 2013, V.2, Ch.7, ISBN 978-3-527-32979-3, pp. 163-184

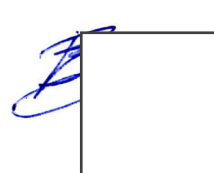
Список статей:

1. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Ignatov O.V., Guliy O.I. Biological Sensor Based on the Lateral Electric Field Excited Resonator// *Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr.*, 2012, v.59, #5, p.963-969
2. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Бородина И.А., Шихабудинов А.М., Кузнецова А.С., Теплых А.А. Характеристики антисимметричных волн Лэмба нулевого порядка в структуре «пьезоэлектрическая пластина – нанокompозитный полимерный слой – жидкость»// *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*. 2012. N7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul12/7/text.pdf>.
3. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Кузнецова А.С., Бородина И.А. Использование нанокompозитных полимерных материалов для оптимизации параметров ультразвуковых излучателей// *Радиотехника*, 2012, #12, с. 90-94
4. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Borodina I.A., Kolesov V.V., Sknarya A.V., Petrova N.G., Nosov A.V. Hydroacoustic Emitters on the Basis of the Lamb Antisymmetric Wave of the Zero Order in the Piezoelectric Plate// *Journ. of Appl. Phys.*, v.112, #12, 15.12.2012, 5 pages.
5. Borodina I.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Teplykh A.A. "Acoustic Waves in a Structure Containing Two Piezoelectric Plates Separated by an Air (Vacuum) Gap", *Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr.*, 2013, v.60, #12, pp.2677-2681.
6. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Borodina I.A., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A., Manga E., Feuillard G. "The Effect of Nanocomposite Polymeric Layer on the Radiation of Antisymmetric Zero-Order Lamb Wave in a Piezoelectric Plate Contacting with Liquid", *Journ. of Applied Phys.*, 2013, v.113, 224507, (8 pages) DOI: 10.1063/1.4810905
7. И. Е. Кузнецова, Б. Д. Зайцев, А.М. Шихабудинов, И. А. Бородина, Е. Ю. Крамаренко, В. В. Колесов, Г.В. Степанов. Акустические свойства магнитных эластомеров и влияние на них внешнего магнитного поля // *Журнал радиоэлектроники*, №10, 2013. <http://jre.cplire.ru/jre/oct13/1/text.pdf>
8. B.D.Zaitsev, I.E.Kuznetsova, A.M. Shikhabudinov, A.A. Teplykh, and I.A.Borodina, The Study of Piezoelectric Lateral - Electric - Field - Excited Resonator, *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectr., and Freq. Contr.*, vol. 61, No. 1, 2014, pp. 166 - 172.
9. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Anisimkin V.I., Teplykh A.A., Shikhabudinov A.M., Kolesov V.V., Yakunin V.G. Noncontact Determination of Thin Films Conductance by the SH_0 Plate Acoustic Waves // *JAP*, 2014, v.115, #4, 044504 DOI:10.1063/1.4862807.
10. Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Теплых А.А., Шихабудинов А.М. Разработка матрицы резонаторов с поперечным электрическим полем на пьезоэлектрической пластине// *Ученые записки физического факультета МГУ*, 2014, #6, С.145326.
11. Теплых А.А., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Теоретическая модель резонатора с поперечным возбуждающим электрическим полем// *Ученые записки физического факультета МГУ*, 2014, #5, 145328.
12. Зайцев Б.Д., Шихабудинов А.М., Теплых А.А., Бородина И.А., Кузнецова И.Е. Практические применения пьезоэлектрических резонаторов с поперечным электрическим полем // *Ученые записки физического факультета МГУ*, 2014, #5, С.145330.

13. Зайцев Б.Д., Шихабудинов А.М., Бородин А.А., Теплых А.А., Кузнецова И.Е. Исследование пьезоэлектрических резонаторов с поперечным электрическим полем// Ученые записки физического факультета МГУ, 2014, #5, С. 145329.
14. Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д. Влияние электрических граничных условий на существование аномального резисто-акустического эффекта// Ученые записки физического факультета МГУ, 2014, #5, С. 145331.
15. Зайцев Б.Д., Шихабудинов А.М., Теплых А.А., Кузнецова И.Е. Разработка бесконтактного метода измерения проводимости тонких пленок с помощью линии задержки на SH_0 волнах// Ученые записки физического факультета МГУ, 2014, #5, С. 145327.
16. Теплых А.А., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Характеристики акустических волн в анизотропном цилиндрическом волноводе из ниобата лития //Ученые записки физического факультета МГУ, 2014, #5, С.145333.
17. Б.Д. Зайцев, А.М. Шихабудинов, И.А. Бородин, А.А. Теплых, И.Е. Кузнецова «Составной пьезоэлектрический резонатор с поперечным электрическим полем», Письма в ЖТФ, 2015, Т.41, В.21, СС.14-20.
18. Boris D. Zaitsev, Alexander M. Shikhabudinov, Andrey A. Teplykh, Iren E. Kuznetsova " Liquid sensor based on a piezoelectric lateral electric field-excited resonator", Ultrasonics, no. 63, 2015, pp. 179-183.
19. Teplykh, B. Zaitsev, I. Kuznetsova. Numerical Model of Lateral Electric Field Excited Resonator on Piezoelectric Plate Bordered with Viscous and Conductive Liquid // Physics Procedia, 2015, v70, pp. 227-230.
20. Teplykh A., Zaitsev B., Kuznetsova I. Numerical Model of Piezoelectric Lateral Electric Field Excited Resonator // Sensors & Transducers 2015, V. 184, Issue 1, pp. 60-65.
21. И.А. Бородин, Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова, А.А. Теплых, А.М. Шихабудинов «Разработка матрицы резонаторов с поперечным электрическим полем на пьезоэлектрической пластине», Известия РАН. Серия физическая, 2015, т.79, №10, с.1442-1446.
22. Б.Д. Зайцев, А.М. Шихабудинов, И.А. Бородин, А.А. Теплых, И.Е. Кузнецова «Бесконтактный способ возбуждения и регистрации объемной акустической волны с помощью линии задержки на SH_0 -волн», Радиотехника, 2015, №7, сс.22-25.
23. I.A. Borodina, B.D. Zaitsev, A.A. Teplykh, A.M. Shikhabudinov, I.E. Kuznetsova "Array of piezoelectric lateral electric field excited resonators", Ultrasonics, no. 62, 2015, pp. 200-202.
24. В.И. Анисимкин, И.Е. Кузнецова, Б.Д. Зайцев «Акустические пластинчатые моды: особенности распространения и основные характеристики», Радиотехника, 2015, №8, сс.17-24.
25. Б.Д. Зайцев, И.А. Бородин, А.А. Теплых, И.Е. Кузнецова «Подавление сигналов тройного и пятикратного прохождения в линии задержки на основе SH_0 акустической волны в пьезоэлектрической пластине», Радиотехника, 2015, №8, сс.25-30.
26. I.E. Kuznetsova, B.D. Zaitsev "The peculiarities of the Blustein-Gulyaev wave propagation in structures containing conductive layer", Ultrasonics, no. 59, 2015, pp. 45-49.
27. Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Шихабудинов А.М., Кузнецова И.Е. Бесконтактный метод измерения проводимости тонких пленок // Нелинейный Мир, 2015, №2, с.60-61.
28. Б.Д.Зайцев, И.А. Бородин, А.А. Теплых, И.Е. Кузнецова «Полосовой фильтр на основе SH_0 волны в пьезоэлектрической пластине», Радиотехника, 2015, № 10, сс. 141 – 145.

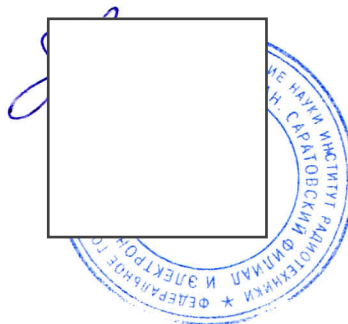
29. А.А. Теплых, Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова «Теоретический анализ акустических волн, распространяющихся в круглом цилиндрическом волноводе», Радиотехника, 2015, №10, сс. 93 – 101.
30. Б.Д. Зайцев, А.А. Теплых, И.А. Бородина, И.Е. Кузнецова «Возбуждение и прием акустических волн в пьезоэлектрических цилиндрах», Радиотехника, 2015, №10, сс. 121 – 126.
31. Б.Д. Зайцев, А.М. Шихабудинов, И.А. Бородина, А.А. Теплых, И.Е. Кузнецова «Бесконтактный способ возбуждения и регистрации объемной акустической волны с помощью линии задержки на SH_0 волне», Радиотехника, 2015, №7, сс. 22 – 25.
32. Б.Д. Зайцев, А.М. Шихабудинов, И.А. Бородина, А.А. Теплых, И.Е. Кузнецова « Подавление сигналов тройного и пятикратного прохождения в линии задержки на основе SH_0 акустической волны в пьезоэлектрической пластине », Радиотехника, 2015, №8, сс. 25 – 30.

Зав. лабораторией Саратовского филиала
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, д.ф.-м.н., профессор



Зайцев Б.Д.

Подпись сотрудника Саратовского филиала
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
Зайцева Б.Д. подтверждаю
инспектор отдела кадров СФ ИРЭ РАН



Толмачева И.М.

15 апреля 2016 г.