

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Буркова Сергея Ивановича «Влияние внешних статических воздействий на распространение упругих волн в пьезокристаллах и слоистых структурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Теоретические и экспериментальные исследования особенностей распространения ультразвуковых волн в твердых телах служат не только интересам развития различных направлений в науке, в том числе радиофизики, но и вносят существенный вклад в инновационное развитие техники. На основе полученных знаний разрабатывается элементная база для устройств, широко используемых в современных системах связи и локации, в медицине, в ультразвуковых приборах, предназначенных для неразрушающего контроля материалов. Несмотря на серьезные успехи, имеется целый ряд нерешенных проблем, к числу которых относится комплекс задач, связанных с изучением возможностей управления характеристиками акустических волн в кристаллах и слоистых структурах с помощью внешних воздействий, таких как электрическое поле, механические нагрузки. Особый практический интерес представляют работы по изучению внешних воздействий на пьезоэлектрические материалы, поскольку именно пьезоэлектрики чаще всего применяются в промышленных изделиях. Все это позволяет считать, что цель диссертации является актуальной.

Диссертация состоит из Введения, семи глав, Заключения, Списка литературы и Приложений. Полный объем диссертации составляет 273 страниц текста, в том числе 101 рисунок, 9 таблиц, список цитируемой литературы, включающий 344 наименования.

Во Введении дан достаточно подробный обзор публикаций по теме диссертации. Основное внимание уделяется статьям, где обсуждаются различные аспекты описания и анализа внешних воздействий на свойства упругих волн в твердотельных структурах. Кроме того, убедительно обосновывается актуальность темы диссертации, ясно описывается степень новизны и практическая значимость результатов работы.

Глава 1 посвящена исследованию влияния внешнего постоянного электрического поля и статического одноосного механического давления на свойства объемных упругих волн в анизотропной среде. Из полученных результатов выделю детальный численный анализ изменения параметров объемных волн в окрестности акустических осей в

кристалле силикосилленита под действием внешнего электрического поля и одноосного механического давления. Интерес представляют результаты расчетов анизотропии коэффициента управляемости, векторов поляризации, групповых скоростей, а также коэффициентов электромеханической связи, проведенных автором для базовых плоскостей в ряде перспективных для промышленного применения кристаллов. Следует отметить, что полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Важное значение имеет анализ области применения линейного приближения при описании влияния внешних воздействий на характеристики упругих волн в пьезоэлектрических материалах.

В главе 2 исследуется влияние электрического поля на отражение объемных волн от границы пьезоэлектрик – вакуум и от границы двух пьезоэлектриков. Наиболее интересными являются результаты, касающиеся поведения коэффициентов отражения от свободной границы германосилленита и ниобата лития. В частности, следует отметить предсказанное автором возбуждение отраженной медленной поперечной волны при падении продольной волны или быстрой поперечной волны для геометрии, в которой без электрического поля медленная поперечная волна не возбуждается. Существенное значение имеет анализ влияния электрического поля на особенности преобразования типов волн при отражении на границе двух пьезокристаллов и границе пьезоэлектрик – изотропная среда.

В главе 3 теоретически исследуется влияние одноосного механического давления на отражение объемных акустических волн от границы пьезоэлектрик – вакуум и от границы двух пьезоэлектриков. Отмечу результаты моделирования отражения волн в структурах плавный кварц – германосилленит и ниобат лития – германосилленит. Автор показал, что максимальные изменения коэффициентов отражения в системе ниобат лития – германосилленит при приложении одноосного давления происходят в окрестности акустической оси вследствие снятия вырождения сдвиговых волн в германосиллените, однако величины амплитудных коэффициентов преломленных упругих волн меняются слабо.

Глава 4 посвящена волнам в пьезоэлектрических пластинах. Из результатов данной главы выделю анализ влияния внешнего электрического поля на характеристики упругих волн в пластинах германосилленита и лангасита, в том числе на гибридизацию мод и

величину их фазовых скоростей. Полученные данные позволяют выбрать оптимальные направления распространения волны при создании акустоэлектронных устройств, например, линии задержки. Интерес также представляют результаты по температурным зависимостям фазовых скоростей волн в пластине лангасита и компенсации температурных изменений скорости за счет электрического поля.

В главе 5 численно исследуется влияние постоянного электрического поля на распространение упругих волн в структурах типа твердый слой – полубесконечная подложка. Необходимо отметить, что вычисленные автором для ряда слоистых структур зависимости, в том числе изменения фазовых скоростей, угла отклонения потока энергии от волновой нормали, т.е., угла сноса акустического пучка, а также поведение коэффициента электромеханической связи достаточно хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. С практической точки зрения существенный интерес представляют указанные в диссертации слоистые структуры, которые должны обладать достаточно большим коэффициентом электромеханической связи, достаточно большим коэффициентом управляемости электрическим полем, а угол сноса акустического пучка при этом оказывается весьма малым.

В главе 6 исследуется влияние одноосного механического напряжения на распространение упругих волн в пьезоэлектрических структурах слой-подложка. Прежде всего, привлекают внимание результаты анализа соотношения вклада геометрической нелинейности и вклада нелинейных упругих модулей третьего порядка в изменение характеристик волн. Приводимые автором зависимости наглядно показывают, насколько существенным может быть одновременный учет обоих вкладов. Достоинством является тот факт, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами вычислений коэффициентов управляемости внешним механическим напряжением. Интерес представляют и результаты численного анализа особенностей гибридизации мод в слоистых структурах при приложении механических напряжений.

В главе 7 представлен программный комплекс для расчета характеристик акустических волн при приложении к среде внешнего электрического поля и механического давления. Судя по описанию, а также объему и качеству полученных результатов, набор программ, созданный диссертантом, является надежным средством получения данных о влиянии внешних условий на распространение волн в однородных

пьезоэлектриках, в пьезоэлектрических пластинах и многослойных пьезоэлектрических структурах.

В работе имеются недостатки.

1) Утверждение о возможности управления распространением волны по принципу «вкл/выкл» (см. вывод 6 на стр. 124) недостаточно обосновано. Диссертант делает его, исходя из анализа существования корней дисперсионного уравнения. Я считаю, что дополнительно следовало бы вычислять функцию Грина. Появление/исчезновение корня дисперсионного уравнения соответствует перемещению полюса функции Грина с «нефизического» листа римановой поверхности на «физический» и наоборот. Поскольку все происходит вблизи предельной скорости объемных волн подложки, т.е., вблизи точки ветвления, то и «нефизический полюс» приводит к заметным особенностям в зависимости функции Грина от волнового вектора на «физическом» листе. В результате, может быть, что волна на поверхности эффективно возбуждается в любом случае. При «нефизическом» полюсе поле стремится к нулю с расстоянием от источника, и я согласен с диссертантом в том, что далеко от источника волна «включается/выключается». Однако поле убывает достаточно медленно, так что в пределах подложки разумных размеров поле источника может слабо зависеть от появления/исчезновения корня дисперсионного уравнения.

2) В тексте диссертации используются разные обозначения угловых градусов, например, на стр. 53. На стр. 104-105 местами появляются странные показатели степени, например, 10^{-07} . На стр. 119 отмечается, что электрическое поле вызывает «... экспоненциальное поведение коэффициентов управляемости», но непонятно, откуда берется экспонента; по-видимому, подразумевается степенная зависимость. На стр. 148 приведена комбинация материальных констант (7.1), которую автор называет «коэффициентом электромеханической связи», хотя (7.1) отличается от общепринятого выражения для коэффициента электромеханической связи.

Замечаний по оформлению диссертации нет. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

В целом, диссертационная работа производит положительное впечатление и является законченным научно-исследовательским трудом. Достоверность результатов подтверждается корректностью постановки решаемых задач, использованием точных

вычислительных методов, согласием с экспериментальными данными других исследователей. Соответствие результатов работы мировому уровню подтверждается их публикацией в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Совокупность полученных результатов по управлению характеристиками упругих волн за счет приложения электрического поля и внешнего давления можно квалифицировать как существенный вклад в физику волновых процессов в пьезоэлектрических материалах и структурах. Работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика.

Считаю, что Бурков Сергей Иванович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Ведущий научный сотрудник

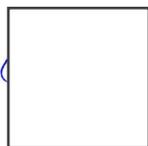
Федерального государственного бюджетного

учреждения науки

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова

Российской академии наук

доктор физико-математических наук



Даринский Александр Николаевич

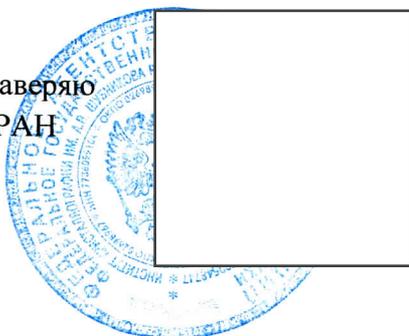
119333, Москва, Ленинский пр. 59, Институт кристаллографии РАН

Тел. (495) 330-82-74, эл. почта: Alexandre_Dar@mail.ru

Подпись Даринского А.Н. заверяю

И.о. ученого секретаря ИК РАН

к.ф.-м.н.



О.А. Алексеева

Список публикаций А.Н. Даринского 2012-2016 по теме диссертации С.И. Буркова.

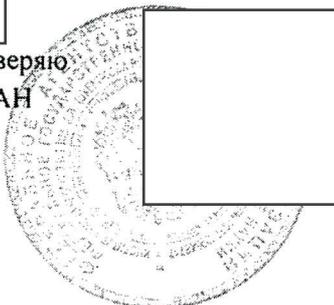
1. Darinskii A.N., Weihnacht M., and Schmidt H., "FEM Simulation of SAW Refection in Crystals", AIP Conf. Proc. 1433, 251-254 (2012).
2. Darinskii A.N., Weihnacht M., and Schmidt H., "Anisotropy effects in the reflection of surface acoustic waves from obstacles", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 60 (1), 235-242 (2013).
3. Darinskii A.N., Weihnacht M., and Schmidt H., "Mutual conversion of bulk and surface acoustic waves in gratings of finite length on half-infinite substrates. I. FE analysis of surface wave", Ultrasonics 53 (2013) 998–1003.
4. Darinskii A.N., Weihnacht M., and Schmidt H., "Mutual conversion of bulk and surface acoustic waves in gratings of finite length on half-infinite substrates. II. FE analysis of bulk wave generation", Ultrasonics 53 (2013) 1004–1011.
5. Л.А. Кулакова, Н.С. Аверкиев, А.Н. Даринский, Э.З. Яхкинд, "Диагностика тонкого спектра в квантовой яме лазерных гетероструктур ультразвуковой деформацией", Квант. электроника, 2013, 43 (5), 410–413.
6. Darinskii A.N., Weihnacht M., and Schmidt H., "Resonant reflection of a surface acoustic wave from strip waveguides", Wave Motion, 50, 1185–1196 (2013).
7. Благоев А.Е., Даринский А.Н., Ковальчук М.В., Писаревский Ю.В., Просеков П.А., Таргонский А.В. «Рентгеноакустические резонаторы для управления пространственными характеристиками рентгеновского излучения», Акустический журнал, 59, 5, с. 561-568 (2013).
8. A.N. Darinskii, M. Weihnacht, and H. Schmidt, "Rayleigh wave scattering from a vertical edge of isotropic substrates", Ultrasonics, 54, 1999–2005 (2014).
9. A.N. Darinskii, M. Weihnacht, and H. Schmidt, "Surface acoustic wave reflection/transmission at vertical borders of piezoelectric substrates", Ultrasonics, 56, 318–324 (2015).
10. A. A. Kutsenko, A. L. Shuvalov, O. Poncelet, A. N. Darinskii, "Tunable effective constants of the one-dimensional piezoelectric phononic crystal with internal connected electrodes", J. Acoust. Soc. Am. 137 (2), 606-616 (2015).
11. A.N. Darinskii, A.L. Shuvalov, O. Poncelet, A.A. Kutsenko, "Bulk longitudinal wave reflection/transmission in periodic piezoelectric structures with metallized interfaces", Ultrasonics 63, 118-125 (2015).
12. A. A. Kutsenko, A. L. Shuvalov, O. Poncelet, A. N. Darinskii, "Quasistatic stopband and other unusual features of the spectrum of a one-dimensional piezoelectric phononic crystal controlled by negative capacitance", Comptes Rendus Mecanique. - V.343, 2015, P.680–688.





Даринский Александр Николаевич

Подпись Даринского А.Н. заверяю
И.о. ученого секретаря ИК РАН
к.ф.-м.н.



О.А. Алексеева