

«Утверждаю»

Проректор

Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова» (МГУ)



Исъян Андрей Анатольевич

» сентября 2015г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Теличко Арсения Витальевича «Физические и акустические свойства синтетического монокристалла алмаза IIa типа и пьезоэлектрических слоистых структур на его основе для применения в акустоэлектронике», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

В настоящее время в науке и технике широко используются акустоэлектронные приборы. Одним из таких приборов являются акустические резонаторы, которые незаменимы в устройствах для систем стабилизации частоты, вторичных стандартов частоты и времени, высокостабильных генераторов различного назначения и т.д. В последние годы акустические резонаторы рассматриваются и как чувствительные элементы в различных сенсорах физико-химических воздействий, медицинских приборах. К таким приборам предъявляется ряд требований, такие как возможность их работы при высоких давлениях и температурах в широком диапазоне частот от единиц до десятков гигагерц. Акустические резонаторы, изготовленные из таких классических материалов как кварц или сапфир, применяемые для целей акустоэлектроники на относительно низких частотах, не подходят для СВЧ области по ряду причин. Для приборов, функционирующих на частотах единиц и десятков ГГц, необходимо использовать высокочастотные подложки из кристаллов, обладающих сочетанием таких свойств, как низкое акустическое поглощение, высокие скорости звука, высокий коэффициент электромеханической связи.

В начале 21-го века в ФГБНУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов» создана технология и освоено производство высококачественных

синтетических объёмных и плёночных моно- и поликристаллов алмаза – материалов с уникальным сочетанием физико-химических параметров, превосходящих природные аналоги. Эти материалы являются перспективными для создания новых приборов акустоэлектроники, и том числе акустических резонаторов, работающих в диапазоне гигагерцовых частот. Однако физические, в том числе акустические, свойства новых перспективных материалов на основе синтетического алмаза IIa типа полностью не изучены. До конца не исследованы особенности поведения составных акустических резонаторов с подложками из синтетического алмаза IIa типа в СВЧ-диапазоне, включая появление паразитных резонансов, немонотонность частотных зависимостей добротности, что требовало дополнительного тщательного изучения. Другие нерешенные задачи касались уточнения температурной зависимости упругих постоянных этого кристалла, что актуально для исследования нелинейных температурных свойств датчиков и приборов.

Решению этих, а также ряда других актуальных вопросов, связанных с исследованием физических и акустических свойств синтетического монокристалла алмаза IIa типа и пьезоэлектрических структур на его основе, посвящена диссертационная работа А.В. Теличко.

Тема диссертационной работы Теличко Арсения Витальевича «Физические и акустические свойства синтетического монокристалла алмаза IIa типа и пьезоэлектрических слоистых структур на его основе для применения в акустоэлектронике» является фундаментальной, актуальна и имеет прикладной характер.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, первая из которых обзорная, заключения и приложений. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, в ней содержится 69 рисунков, 24 таблицы и список цитируемой литературы, включающий 170 источников. Всего по результатам диссертации опубликовано 6 статей в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК'ом Минобразования и науки РФ, также 3 статьи опубликованы в журналах, индексируемых в поисковой платформе Web of Science.

Во введении сформулированы задачи диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также приведено краткое содержание работы.

В первой главе проведен обзор литературы по теме диссертации, рассмотрены современные материалы, кристаллы и слоистые пьезоэлектрические структуры,

используемые в акустоэлектронике и пьезотехнике. Показано, что не для всех широко используемых на данный момент кристаллов известны полные наборы материальных констант. Проанализированы особенности распространения упругих волн в кристаллах и слоистых структурах. Приведены термодинамические потенциалы, рассмотрены линейные и нелинейные упругие свойства твердых тел. Проанализированы основные типы акустических волн в слоистых структурах. Исследована зависимость упругих постоянных 2-го порядка кристаллов от давления. В линейном приближении зависимости скоростей ОАВ от величины внешнего воздействия получены выражения для тензора Грина-Кристоффеля в однородно деформированном кристалле, введены коэффициенты управления скорости ОАВ внешним давлением.

Проведен анализ механизмов затухания Ахиезера и Ландау-Румера в кристаллах. Показано, что при смене механизмов меняется частотная зависимость параметра качества и акустического поглощения в твердом теле. Описывается параметр Грюнайзена, от величины которого квадратично зависят коэффициент акустического поглощения и параметр качества составного акустического резонатора. Показано, что частотные характеристики составного акустического резонатора удобно исследовать с помощью форм-фактора m тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя. Описывается используемая в работе программа NBAR ver. 2. для моделирования частотной зависимости форм-фактора, его действительной и мнимой частей. (Программа написана Бурковым С.И.) Рассмотрены основные типы акустических резонаторов и упругих колебаний в них.

Вторая глава диссертации посвящена развитию феноменологической теории зависимости упругих коэффициентов кристаллов от температуры. Для тригональных, тетрагональных и гексагональных кристаллов получены аналитические выражения для температурных зависимостей упругих коэффициентов 2-го порядка, в которых учтены упругие постоянные 3-го порядка. Используя полученные выражения для тригональных (LiNbO_3 , SiO_2 , $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, Al_2O_3), гексагональных (Zn , Mg , Er) и тетрагональных (TeO_2 , KN_2PO_4) кристаллов, автором были рассчитаны температурные зависимости коэффициентов упругости второго порядка. Проведено сравнение рассчитанных значений этих величин для тригональных кристаллов LiNbO_3 и SiO_2 с экспериментальными данными. Обнаружено согласие между теоретическими и экспериментальными результатами.

Для кубических кристаллов получены аналитические уравнения для температурной зависимости коэффициентов упругости второго порядка с учетом коэффициентов упругости

3 и 4 порядков. Результаты теоретических расчетов температурной зависимости коэффициентов упругости второго порядка в ряде кубических кристаллов с использованием этих уравнений находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными другими авторами.

В третьей главе экспериментально исследуется распространение объемных акустических волн в синтетическом монокристалле алмаза IIa типа, подвергнутого одноосному сжатию. Проанализировано распространение акустических волн в кристаллах симметрии $m\bar{3}m$. Приведены известные данные по качеству исследуемых образцов синтетического монокристалла алмаза IIa типа, выращенных методом HPHT в ФГБНУ ТИСНУМ. Приводится описание экспериментальных установок для проведения ультразвуковых экспериментальных измерений на базе современных приборов RITEK RAM-500, Tektronix DPO71254B и Avtech AVRK-2-B, с помощью которых методом длинного импульса и импульсным эхо-методом экспериментально измерены скорости ОАВ в синтетическом монокристалле алмаза IIa типа, что позволило рассчитать величины упругих постоянных 2-го порядка. Определенные в работе значения упругих постоянных 2-го порядка находятся в хорошем соответствии с данными других авторов для величин постоянных упругости в алмазах естественного происхождения. Определена оптимальная система из 6-ти линейно независимых уравнений, необходимых для вычисления всех упругих постоянных 3-го порядка в кристаллах $m\bar{3}m$ по результатам экспериментальных измерений зависимости скорости объемных волн от однородного сжатия. Проведены экспериментальные исследования зависимостей скоростей различных мод объемных акустических волн в алмазе от величины одноосного сжатия. При всех давлениях, используемых в работе, экспериментально измеренные зависимости скоростей ОАВ от давления имели линейный характер. Эти измерения позволили впервые определить численные значения упругие постоянные третьего порядка в исследованных образцах синтетического алмаза IIa типа, выращенного в ФГБНУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов». Определенные в диссертации значения УПЗП достаточно хорошо согласуются с данными других авторов для алмазов естественного происхождения. Однако имеются некоторые расхождения в величинах коэффициентов C_{123} и C_{144} .

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию составного акустического

резонатора с (100) ориентированной подложкой из синтетического монокристалла IIa типа. Резонатор состоит из алмазной подложки, на которую нанесена пьезоэлектрическая пленка AlN с металлическими электродами. Исследуя наблюдаемые линии Кикучи, был оценен размер нарушенного в процессе обработки поверхностного слоя подложки из образца алмаза, который не превышал 30 нм. Проведен анализ качества напыляемых пленок на подложки образцов из монокристалла алмаза. Приведено описание исследуемых в работе образцов составного акустического резонатора. Проведено моделирование слоистых пьезоэлектрических структур «Me1/AlN/Me2/(100) алмаз». Описана экспериментальная установка в составе векторного анализатора цепей Agilent E5071C и рабочей станции M-150 и методика измерения параметров экспериментальных резонаторов. Измерения частотных характеристик проводились в частотном интервале 300 МГц – 20 ГГц. Экспериментально измерены частотные зависимости добротности ряда составных акустических резонаторов с подложкой из синтетического монокристалла алмаза IIa типа. Исследована температурная зависимость резонансных частот обертонов, определен ТКЧ составного акустического резонатора. Получены высокие значения параметра качества при комнатной температуре: $Q \times f \approx 1,5 \cdot 10^{14}$ Гц (на 6,5 ГГц). Исследованы паразитные пики, возникающие вблизи объемного резонанса; показано, что данные пики по мнению автора связаны с возбуждением различных мод волн Лэмба. Из экспериментальных исследований параметра качества экспериментальных резонаторов обнаружена смена режимов затухания: переход от механизма Ахиезера к механизму Ландау-Румера в окрестности 1 ГГц при комнатной температуре для синтетического монокристалла алмаза IIa типа. Проанализированы механизмы затухания ОАВ в составных акустических резонаторах. По результатам экспериментальных измерений добротности резонатора рассчитано затухания продольных акустических волн в монокристалле алмаза в направлении [100] в диапазоне (0,5-10) ГГц. Проведен расчет параметра Грюнайзена и время термической релаксации для продольных акустических фононов в направлении [100].

В Заключение излагаются основные результаты работы.

Наиболее существенные результаты работы, обладающие научной новизной и практической значимостью, состоят в следующем:

1. Уточнена теория для температурной зависимости упругих постоянных 2-го порядка в кубических кристаллах. Показано, что такое аналитическое представление значительно

улучшает согласие рассчитанных температурных зависимостей упругих постоянных с экспериментом.

2. Исследовано влияние одноосного сжатия на скорость объемных акустических волн в монокристалле алмаза. На основании этих измерений для синтетического монокристалла алмаза Па типа впервые определены значения упругих постоянных 3-го порядка в нем.

3. Впервые экспериментально исследована частотная зависимость добротности составного акустического резонатора с подложкой из синтетического монокристалла алмаза Па типа в диапазоне (0,5-10) ГГц.

4. Проанализированы частотная зависимость добротности составного акустического резонатора на (100) алмазной подложке и вклады в акустические потери от различных механизмов поглощения. Показано, что добротность такого резонатора в основном определяется поглощением звука в алмазной подложке.

5. Экспериментально измеренные АЧХ резонаторов в СВЧ области в сочетании с высокими значениями параметра качества $Q \times f$ синтетического монокристалла алмаза Па типа свидетельствуют о возможности создания высокодобротных акустических микрорезонаторов на частотах вплоть до ~ 10 ГГц. На отдельных образцах составных акустических резонаторов наблюдались обертоны на частоте 20 ГГц с добротностью ~ 3300 . Данный результат указывает на возможность дальнейшего повышения рабочих частот акустоэлектронных устройств.

6. Исследована серия составных акустических резонаторов с подложкой из синтетического монокристалла алмаза Па типа с (100) ориентацией в широком диапазоне частот. Показано, что изменение частотной зависимости параметра качества $Q \times f$ происходит вблизи 1 ГГц: При частотах $f < 1$ ГГц наблюдается постоянство параметра качества, $Q \times f \approx 1,8 \cdot 10^{13}$ Гц, в то время как при $f > 1$ ГГц выполняется соотношение $Q \times f \approx 1,8 \cdot 10^4 \times f$ Гц. Данный факт в работе объяснен сменой механизма фонон-фононного затухания с механизма Ахиезера на механизм Ландау-Румера. Получено, что согласование теоретических оценок с экспериментальными результатами соответствует параметру Грюнайзена для продольной акустической моды $\gamma_{100}^L \approx 0,85$, а время термической релаксации фононов при комнатной температуре составляет $\tau_i \approx 1,6 \cdot 10^{-10}$ с.

Достоверность результатов диссертационной работы определяется соответствием теоретических данных с результатами экспериментальных измерений, которые получены с

применением современной высокоточной научной аппаратуры. Исследуемые автором модели составных резонаторов физически и математически обоснованы. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Результаты, полученные в диссертации А.В. Теличко, могут быть рекомендованы для использования в Институте радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН; Институте прикладной физики РАН; Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова; Акустическом институте имени Н.Н. Андреева; ОАО НИИ ЭЛПА; лабораториях акустоэлектронного профиля, а также в других научных и учебных центрах, где ведутся исследования по близкой тематике.

Однако рецензируемая работа не лишена некоторых недостатков:

1. В работе присутствует значительное количество опечаток и незначительных ошибок. Наиболее критичными представляются опечатка в знаке величины C_{123} , а также отсутствие таблицы термодинамических потенциалов в приложении.
2. В работе отсутствует анализ альтернативных акустических методов определения упругих постоянных 3-го порядка: квазистатический метод Терстона-Браггера и спектральный метод, основанный на измерении эффективности генерации второй гармоники в поле акустической волны конечной амплитуды.
3. Недостаточно подробно проанализированы экспериментальные ошибки, возникающие при измерении скорости акустических волн и ее изменения при статическом нагружении в образцах малых размеров.
4. Исследования характеристик составного акустического резонатора не следовало ограничивать лишь (100) ориентированными алмазными подложками. Представляет практический интерес исследование резонаторов на алмазных подложках с другими кристаллографическими ориентациями, например, (111), где скорость продольной ОАВ в алмазе максимальна.
5. Смена механизмов затухания с механизма Ахиезера на механизм Ландау-Румера, а также величина времени термической релаксации фононов τ , требуют более тщательной проверки, включающей в себя температурные измерения, что не было проведено в работе.

Отмеченные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы А.В. Теличко. Результаты работы актуальны, имеют как теоретическое, так и практическое

значение. Они могут быть применены при разработке сенсоров высоких температур или давлений; для более точного учета температурного сдвига частоты резонатора. Полученные в работе результаты являются важными с точки зрения повышения рабочих частот резонаторов, а также создания высокодобротных акустоэлектронных устройств СВЧ диапазона. Теличко А.В. продемонстрировал понимание проблем физики конденсированного состояния и акустоэлектроники, показал высокий уровень владения математическим аппаратом, программными продуктами и средствами вычислительной техники. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах из перечня ВАК, апробированы на научных всероссийских и престижных международных семинарах, и конференциях. Автореферат и публикации автора достаточно полно передают основное содержание и результаты диссертационной работы.

Диссертационная работа «Физические и акустические свойства синтетического монокристалла алмаза Па типа и пьезоэлектрических слоистых структур на его основе для применения в акустоэлектронике» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Теличко Арсений Витальевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на семинаре кафедры акустики физического факультета МГУ.

Присутствовало 16 членов кафедры.

Итоги голосования.

За предложенный вариант отзыва 16 чел. Против-нет. Воздержавшихся-нет.

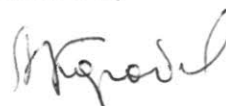
Протокол №.10 от «9» сентября 2015 года

Заведующий кафедрой акустики физического факультета МГУ,
академик РАН



О.В. Руденко

Профессор кафедры акустики физического факультета МГУ,
доктор физико-математических наук



А.И. Коробов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2. кафедра акустики

Адрес электронной почты: info@physics.msu.ru

Телефон: (495) 939-30-81

Веб-сайт: <http://www.phys.msu.ru>

Отзыв составил:

Профессор, д.ф.-м.н.,



А.И. Коробов

ФИО: Коробов Александр Иванович

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность: 01.04.06 - Акустика

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра акустики

Телефон: +7 (495) 939-18-21

Адрес электронной почты: aikor42@mail.ru

Наименование организации: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Должность: профессор