

ОТЗЫВ

Официального оппонента к.ф.-м.н. Алексева Сергея Георгиевича на диссертацию Теличко Арсения Витальевича «Физические и акустические свойства синтетического монокристалла алмаза Па 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».

Диссертационная работа Теличко Арсения Витальевича посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию физических и акустических свойств бесприимесного высокочистого синтетического монокристалла алмаза Па типа, выращенного в ФГБНУ ТИСНУМ. В данной работе были исследованы температурные зависимости упругих постоянных 2-го порядка (УП2П) кристаллов различных симметрий, экспериментально определены скорости объемных акустических волн (ОАВ) в синтетическом монокристалле алмаза, определены упругие постоянные 2-го и 3-го (УП3П) порядка алмаза. Представлены данные по моделированию и экспериментальному исследованию составного акустического резонатора с алмазной подложкой, имеющего высокие значения добротности на СВЧ.

Синтетический монокристалл алмаза является перспективным материалом акустоэлектроники ввиду высоких скоростей ОАВ, а также других уникальных физико-химических свойств, связанных, в первую очередь, с его высокой твердостью. Благодаря высокой твердости кристалла алмаза, на его основе возможна конструкция высокоточных датчиков внешних воздействий, например деформации. Использование акустических резонаторов и генераторов с подложкой из высокочистого синтетического монокристалла алмаза востребовано в связи с возможностью повышения рабочих частот таких устройств до десятка ГГц. Учитывая вышесказанное, данная диссертационная работа является достаточно актуальной.

В процессе своего исследования автор решал следующие важные задачи:

1. Развитие феноменологической теории температурной зависимости упругих постоянных 2-го порядка с учетом нелинейных упругих постоянных 3-го и 4-го (УП4П) порядков;
2. Определение скоростей ОАВ и вычисление УП2П синтетического монокристалла алмаза Па типа;
3. Расчет коэффициентов управления скоростей ОАВ алмаза под давлением, выбор системы уравнений для раздельного определения УП3П;
4. Экспериментальное исследование зависимости скоростей ОАВ в ориентированных образцах алмазов от одноосного давления и вычисление УП3П;
5. Исследование добротности как функции частоты для составного акустического резонатора на основе слоистой пьезоэлектрической структуры «Al/AlN/Mo/(100) алмаз»;

6. Определение эффективных частотных областей возбуждения САР и анализ зависимости $Q(f)$ для него.

7. Определение вкладов в совокупное акустическое затухание в составном акустическом резонаторе с подложкой из синтетического монокристалла алмаза, изучение особенностей механизмов акустического затухания Ахиезера и Ландау-Румера в этом материале.

Диссертационная работа Теличко А.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Во введении автор кратко описывает объект исследования, актуальность работы, а также формулирует цели и задачи работы. Сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы полностью посвящена теоретической части и обзору литературы. Приводятся теоретические модели для анализа распространения объемных акустических волн в кристаллах, рассматривается влияние внешних воздействий на собственные значения тензора Грина-Кристоффеля. Описывается составной акустический резонатор как пьезоэлектрическая слоистая структура электрод/пьезоэлектрик/электрод /подложка. Анализируется распространение акустических волн в таких слоистых структурах, приводится вывод форм-фактора m для тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя, который напрямую связан с излучаемой акустической мощностью тонкопленочного преобразователя. Описываются и анализируются механизмы фонон-фононного затухания Ахиезера и Ландау-Румера, описаны основные типы акустических резонаторов, произведен обзор литературы по теме диссертации.

Вторая глава диссертационной работы посвящена феноменологической теории температурной зависимости упругих постоянных кристаллов. Получены выражения для температурных зависимостей упругих постоянных 2-го порядка тетрагональных, тригональных и гексагональных кристаллов с учетом упругих постоянных 3-го порядка. Выполнен численный расчет температурных зависимостей упругих постоянных 2-го порядка для кубических кристаллов с учетом упругих постоянных 3-го и 4-го порядков. Используя известные данные по значениям упругих постоянных 4-го порядка некоторых кубических кристаллов, произведено сравнение рассчитанных в данной работе температурных зависимостей упругих постоянных с данными других авторов, получено соответствие расчетных значений коэффициентов с экспериментальными данными.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию и изучению упругих свойств синтетического монокристалла алмаза Па типа, выращенного методом High-Pressure High-Temperature (HPHT). Экспериментальными методами длинного импульса и импульсным эхо-методом определены значения скоростей ОАВ в синтетическом монокристалле алмаза Па типа. Вычислены значения упругих постоянных 2-го порядка и упругих податливостей синтетического монокристалла алмаза. Вычисление упругих постоянных 3-го порядка алмаза потребовало получения аналитических зависимостей коэффициентов управления давлением для различных акустических мод и экспериментальных исследований изменения скоростей ОАВ от величины одноосного сжатия при комнатной температуре.

Для всех исследуемых мод полученные зависимости скоростей ОАВ от величины одноосного сжатия имели линейный характер, по ним были определены коэффициенты управления давлением и, в итоге, получены значения упругих постоянных 3-го порядка синтетического монокристалла алмаза Па типа. Произведено сравнение полученных результатов с данными других авторов, наблюдается хорошее согласие представленных результатов.

В четвертой главе диссертации подробно исследуется составной акустический резонатор, выполненный на основе подложки из синтетического монокристалла алмаза Па типа с (100) ориентацией. В качестве пьезоэлектрической пленки используется AlN. Оценена глубина нарушенного слоя в алмазе как величина, не превышающая 30 нм. Для исследуемого диапазона рабочих частот (от 0,3 ГГц до ~10 ГГц) представлены экспериментальные результаты по исследованию зависимости добротности Q от рабочей частоты f в составном акустическом резонаторе. Особенности частотных зависимостей добротности Q проанализированы с точки зрения форм-фактора m тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя. Наблюдаемая серия паразитных пиков, возникающая в частотной области, близкой к объемному резонансу, связана с возбуждением различных мод волны Лэмба, что подтверждено моделированием. Анализируя частотную зависимость параметра качества $Q \times f$, экспериментально обнаружена смена механизмов фонон-фононного затухания с механизма Ахиезера на механизм Ландау-Румера при комнатной температуре для продольной [100] волны в алмазе вблизи частоты 1 ГГц. Получены значения параметра качества и коэффициента затухания для [100] направления алмаза для обоих механизмов затухания, значение параметра Грюнайзена.

Необходимо отметить, что автором было произведено комплексное и детальное исследование в актуальной на данный момент области науки. Полученные результаты имеют мировой уровень и характеризуют автора как исследователя высокой квалификации. Используемые автором теоретические модели хорошо обоснованы, что подтверждается согласием расчетных и экспериментальных результатов.

К работе имеются следующие замечания:

1. Несмотря на несомненную научную ценность пункта 2.2 («Температурные зависимости упругих постоянных 2-го порядка тригональных, гексагональных и тетрагональных кристаллов»), его связь с физическими и акустическими свойствами синтетического монокристалла алмаза Па типа неочевидна;
2. Вывод главы 4 о соответствии минимумов действительной части форм-фактора зонам с низкой добротностью требует более глубокого изучения, в частности, моделирования частотной зависимости добротности и сравнения ее с полученной экспериментально;
3. В пункте 4.6 приводятся результаты моделирования структуры, которая «номинально соответствует САР А №29». В пункте 4.4.2 приводится фотография образца А №29, содержащего 9 резонаторов различных

конфигураций. Неясно, какому из девяти соответствуют приведенные на рис. 4.27 кривые. Также для полноты анализа был бы очень полезен расчет АЧХ для разных форм электродов.

4. В работе порой встречаются опечатки;

Однако эти замечания нисколько не снижают высокого качества диссертационной работы. Автор продемонстрировал глубокое понимание актуальных проблем акустоэлектроники и уверенное владение современными экспериментальными и расчетными методами.

Автореферат диссертации и опубликованные печатные работы полностью отражают содержание диссертации, а ее название также полностью соответствует проведенному исследованию. Диссертация Теличко А.В. является качественным и законченным исследованием, в котором исследуются и решаются важные проблемы современной акустоэлектроники. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Теличко Арсений Витальевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаб. полупроводниковых приборов (лаб. № 171) ФГБУН Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

24 сентября 2015 г.

Алексеев С.Г.

Подпись Алексеева С.Г. заверяю,
Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН



ФИО	Алексеев Сергей Георгиевич
Ученая степень	Кандидат физико-математических наук
Специальность	01.04.07 «Физика конденсированного состояния»
Почтовый адрес	125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7.
Телефон	(495) 629 34 12
Адрес электронной почты	alekseev@cplire.ru
Наименование организации	ФГБУН Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН
Ученое звание	б/з
Должность	старший научный сотрудник лаб. полупроводниковых приборов (лаб. № 171)