

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Чернозатонского Леонида Александровича 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».

Диссертация Теличко А.В. посвящена исследованию различных физических и акустических свойств синтетического монокристалла алмаза Па типа, выращенного методом НРНТ в ФГБНУ ТИСНУМ. В работе были выполнены экспериментальные исследования с помощью акустических методов, вычислены упругие постоянные 2-го и 3-го порядка синтетического монокристалла алмаза, подробно исследован составной акустический резонатор, выполненный на (100) алмазной подложке.

В настоящее время в акустоэлектронике существует тенденция к увеличению диапазона рабочих частот до единиц, а порой и десятка гигагерц. Поиск новых материалов для акустоэлектронных устройств СВЧ диапазона ограничен немногими кристаллами с малым акустическим поглощением. Использование в качестве подложки для составного акустического резонатора высокочистого синтетического монокристалла алмаза, обладающего высокими скоростями и низким затуханием в СВЧ области, впервые предложенное в данной работе, может послужить в будущем отправной точкой для создания высокочастотных СВЧ генераторов. Надежно определенные значения упругих постоянных 3-го порядка синтетического монокристалла алмаза позволяют качественно и количественно учитывать вклад внешних воздействий на резонансные частоты такого типа резонаторов. Таким образом, данная диссертационная работа, несомненно, является актуальной.

В процессе своего исследования автор решал следующие важные задачи:

1. Развитие теории температурных зависимостей упругих постоянных 2-го порядка кубических кристаллов путем учета упругих постоянных 3-го и 4-го порядков;
2. Экспериментальное определение скоростей объемных акустических волн в синтетическом монокристалле алмаза Па типа, вычисление упругих постоянных 2-го порядка;
3. Экспериментальное исследование зависимости скоростей объемных акустических волн от величины одноосного сжатия в синтетическом монокристалле алмаза Па типа, вычисление упругих постоянных 3-го порядка
4. Экспериментальное исследование составного акустического резонатора, представляющего из себя слоистую пьезоэлектрическую структуру типа «M1/AlN/M2/(100) алмаз» (M – металлический электрод), в широкой СВЧ области, исследование особенностей зависимости добротности от частоты данного резонатора;
5. Исследование влияния качества экспериментальных образцов на добротность составного акустического резонатора, определение вклада различных источников акустических потерь в суммарное затухание в исследуемой структуре.

Диссертационная работа Теличко А.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Во введении представлена область исследований, обоснована актуальность поставленной цели и сформулированы

задачи работы. Также сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, кратко описано содержание диссертации.

В первой главе диссертации автор приводит теоретические модели для анализа распространение объемных акустических волн в кристалле при конечных внешних воздействиях посредством решения задачи на собственные значения и собственные векторы тензора Грина-Кристоффеля. Детально описывается распространение акустических волн в составном акустическом резонаторе, показана прямая связь излучаемой мощности тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя с фактором  $m$ . Представлены механизмы фонон-фононного затухания Ахиезера и Ландау-Румера, приведены выражения для параметра качества  $Q^*f$  и коэффициента затухания  $\alpha$  для данных механизмов. Проведен анализ литературы и основных типов акустических резонаторов, работоспособных на высоких частотах.

Вторая глава диссертационной работы Теличко А.В. посвящена уточнению феноменологической теории температурных зависимостей упругих постоянных 2-го порядка. Соискателем были получены аналитические выражения для температурных зависимостей упругих постоянных 2-го порядка тригональных, тетрагональных и гексагональных кристаллов. Используя известные данные по температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР), упругим постоянным 2-го и 3-го порядка, получены численные значения таких температурных коэффициентов для ряда кристаллов, произведено сравнение с экспериментальными данными, получено достаточно хорошее согласие расчетных значений температурных коэффициентов с экспериментальными данными. Далее, для высоко-симметричных кубических кристаллов произведен учет температурной зависимости ТКЛР, а в тензоре Грина-Кристоффеля произведен учет упругих постоянных вплоть до 4-го порядка и получены аналитические выражения для температурных зависимостей упругих постоянных кубических кристаллов. Ограничиваясь узким кругом кубических кристаллов, по которым известны значения упругих постоянных 4-го порядка, произведено сравнение полученных численных выражений температурных коэффициентов упругих постоянных и произведено сравнение с экспериментальными данными других авторов. Показано, что аналитические выражения для температурных зависимостей упругих постоянных 2-го порядка, полученные в работе, хорошо согласуются с экспериментальными данными в широком диапазоне температур.

В третьей главе экспериментально исследуется синтетический монокристалл алмаза Па типа. Используя экспериментальные методы, с высокой точностью определены значения скоростей продольных и сдвиговых объемных акустических волн в направлениях  $[100]$  и  $[110]$ , вычислены значения упругих постоянных 2-го порядка синтетического монокристалла алмаза. Произведено сравнение полученных результатов с данными других авторов и получено хорошее согласие результатов. Для вычисления упругих постоянных 3-го порядка алмаза произведено исследование распространения объемных акустических волн в кубических кристаллах под действием одноосного сжатия. Получены аналитические выражения для коэффициентов управления давлением, выбрана система независимых уравнений для раздельного определения значений упругих постоянных 3-го порядка. Произведена серия экспериментов, в которой исследовалась зависимость скоростей продольных и сдвиговых волн в синтетическом монокристалле алмаза Па типа от величины одноосного сжатия и получены линейные зависимости. По экспериментальным кривым определены коэффициенты управления давлением и, используя ранее составленную систему независимых линейных уравнений, определены значения упругих постоянных 3-го порядка синтетического монокристалла алмаза при комнатной температуре. Показано, что полученные в работе значения упругих постоянных достаточно неплохо согласуются с данными других авторов. Однако

*требуется дальнейшая работа по уточнению значений некоторых упругих постоянных 3-го порядка алмаза.*

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию составного акустического резонатора с подложкой из синтетического монокристалла  $\text{Pb}$  типа с (100) ориентацией. Представлено исследование качества экспериментальных образцов. Так, анализ Кикучи линий позволяет оценить глубину нарушенного слоя в алмазе как величину, не превосходящую 30 нм независимо от качества обработки поверхности. В широкой СВЧ области произведено экспериментальное исследование зависимости добротности  $Q$  от частоты в составном акустическом резонаторе структуры «Al/AlN/Mo/(100) алмаз». Для серии исследуемых образцов показано, что имеется тенденция к возрастанию параметра качества  $Q \cdot f$  с ростом частоты, однако существуют области с локальными минимумами и максимумами в частотной зависимости параметра качества. Показано, что наличие таких областей может быть проанализировано с точки зрения форм-фактора  $m$  тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя, изучения особенностей его мнимой и действительной частей. Также в главе показано, что наличие паразитных пиков вблизи объемного резонанса в составном акустическом резонаторе следует ассоциировать с возбуждением волн Лэмба, что подтверждается результатами моделирования. В работе показано, что основные потери акустической энергии обусловлены не рассеянием энергии на шероховатостях алмаза или пленки AlN при достаточно высоком качестве обработки поверхностей, а фонон-фононным затуханием. Из исследования серии экспериментальных образцов составных акустических резонаторов обнаружено, что характер частотной зависимости параметра качества  $Q \cdot f$  меняется вблизи частоты 1 ГГц. Так, на частотах ниже 1 ГГц параметр качества оказывается примерно постоянным, в то время как на частоте выше 1 ГГц наблюдается его монотонный рост. Данный факт объяснен с точки зрения смены механизмов фонон-фононного затухания с механизма Ахиезера на механизм Ландау-Румера. Получены значения  $Q \cdot f_{\text{Ахиезер}} \approx 1,8 \cdot 10^{13}$  Гц,  $Q \cdot f_{\text{Л-Р}} \approx 1,8 \cdot 10^4 \cdot f$  Гц, оценен параметр Грюнайзена продольной волны вдоль [100] как 0,85.

Переходя к оценке работы, стоит отметить, что автор произвел весьма ценное и качественное исследование, выполненное в актуальной физической области с применением обоснованных теоретических моделей и высокоточного современного экспериментального оборудования.

К работе Теличко А.В. имеются следующие замечания:

1. В работе порой встречаются ошибки о печатки, которые, впрочем, не мешают пониманию смысла текста;
2. В работе упоминается про направление [111] синтетического алмаза с наивысшими значениями скоростей объемных акустических волн, однако, к сожалению, ни экспериментов по определению скоростей волн в этом направлении, ни результатов по исследованию составных акустических резонаторов, выполненных на алмазной подложки с направлением (111) не приводится;
3. Несмотря на то что полученные в работе значения упругих постоянных достаточно неплохо согласуются с данными других авторов, однако требуется дальнейшая работа по уточнению значений некоторых упругих постоянных 3-го порядка алмаза.

Сделанные замечания являются второстепенными и не снижают значимости полученных Теличко А.В. результатов. Полученные результаты новы и актуальны, полно представлены в престижных российских и зарубежных изданиях, в том числе, в научных журналах из списка ВАК. Апробация работы состоялась на ряде международных и всероссийских симпозиумах и конференциях.

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

Доктор физико-математических наук, профессор  
главный научный сотрудник отдела новых  
методов биохимической физики ФГБУН Институт  
биохимической физики РАН

Подпись Чернозатонского Л.А. удостоверяю

17 сентября 2015 г.

Чернозатонский Л.А.



ФИО	Чернозатонский Леонид Александрович
Ученая степень	Доктор физико-математических наук
Специальность	01.04.06 - Акустика
Почтовый адрес	119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4
Телефон	(495) 939-71-72
Адрес электронной почты	chern@sky.chph.ras.ru
Наименование организации	ФГБУН Институт Биохимической Физики имени Н.М. Эмануэля РАН
Ученое звание	профессор
Должность	главный научный сотрудник отдела новых методов биохимической физики