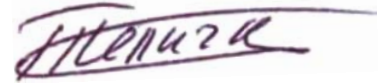


На правах рукописи



Теличко Арсений Витальевич

ФИЗИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО  
МОНОКРИСТАЛЛА АЛМАЗА IIa ТИПА И СЛОИСТЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СТРУКТУР НА ЕГО ОСНОВЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АКУСТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Специальность: 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

**Работа выполнена** на базовой кафедре “Физика и химия наноструктур” Московского физико-технического института (Государственный университет) в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении “Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов” (ФГБНУ ТИСНУМ), Москва, Троицк.

**Научный руководитель:** **Сорокин Борис Павлович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Чернозатонский Леонид Александрович,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник отдела новых методов  
биохимической физики ФГБУН Института биохимической физики РАН

**Алексеев Сергей Георгиевич,**  
кандидат физико-математических наук, старший  
научный сотрудник лаборатории полупроводниковых  
приборов. ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

**Ведущая организация:**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Защита состоится «09» октября 2015 г., в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент



Кузнецова  
Ирен Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В начале 21-го века развитие материаловедения и технологий производства привело к получению высококачественных синтетических объёмных и плёночных моно- и поликристаллов алмаза – материалов с уникальным сочетанием физико-химических параметров, превосходящих природные аналоги и перспективных в акустоэлектронике.

Акустические свойства кристаллов определяются тензорами упругих постоянных различных порядков. Нормальным температурным поведением упругих постоянных в кристаллах считается линейное уменьшение модулей упругости с ростом температуры при не слишком низких температурах и ниже температур плавления, и слабая зависимость (или ее отсутствие) при низких температурах. Знание таких зависимостей важно не только с точки зрения фундаментальной науки, но и для прикладных применений кристаллов. Исследование температурной стабильности акустоэлектронных приборов является актуальной задачей современной науки.

На данный момент широко исследуются акустоэлектронные свойства кристаллов и пьезоэлектрических слоистых структур, выполненных на высококачественных кристаллических подложках. Так, наличие надёжно определенных упругих постоянных 2-го порядка (УП2П) кристалла позволяет вычислять скорости, углы поляризации, направления потока энергии продольных и сдвиговых объёмных акустических волн (ОАВ) в произвольном направлении кристалла. Определение нелинейных упругих постоянных 3-го порядка (УП3П) позволяет предсказывать изменения скоростей звука либо резонансных частот при внешних воздействиях, например, изменений температуры или давления. Необходимо заметить, что наличие примесей и дефектов напрямую влияет на значения модулей УП3П кристаллов, поэтому исследования синтетических беспримесных кристаллов даёт более воспроизводимые результаты по сравнению с их природными аналогами. Без учета точных данных по УП2П и УП3П практически невозможна оптимальная конструкция акустических датчиков давления, температуры, ускорения. Следует заметить, что на момент начала работы отсутствовали экспериментальные значения УП3П синтетического монокристалла алмаза Па типа. Так как алмаз является самым твердым материалом, создание эффективных акустоэлектронных сенсоров давления на его основе является актуальной задачей.

В последнее время имеется тенденция к повышению рабочих частот акустических резонаторов, достигающих порой десятков ГГц. Известно, что акустические резонаторы являются незаменимыми устройствами для систем стабилизации частоты, вторичных стандартов частоты и времени, высокостабильных генераторов различного назначения и т.п. В последние годы акустические резонаторы рассматривают и как чувствительные эле-

менты сенсоров физико-химических воздействий. Кварцевый резонатор, отлично служивший для целей акустоэлектроники на относительно низких частотах, не подходит для СВЧ по ряду причин. Для приборов, функционирующих на частотах  $\sim$  единиц и десятков ГГц, необходимо использовать высокодобротные подложки из кристаллов, обладающих сочетанием таких свойств, как низкое акустическое затухание, высокие скорости звука, высокий коэффициент электромеханической связи, хорошая термостабильность и т.д.

Рассматривая слоистую пьезоэлектрическую структуру, в которой толщины преобразователя и электродов много меньше толщины кристаллической подложки, говорят о составном акустическом резонаторе (САР). Так как толщина звукопровода много больше толщин напыленных слоев, акустоэлектронные свойства САР определяются, в основном, материалом подложки. На данный момент самыми распространенными, и, соответственно, изученными структурами являются резонаторы с подложкой из кварца [1]. Использование такого материала с низкими акустическими потерями на СВЧ, как сапфир [1], позволило получить одно из самых высоких значений параметра качества (произведение добротности на частоту). Для сапфира на 1 ГГц добротность оказалось 48000, что выше, чем у кварца (11600) и кремния (2800) на тех же частотах [1]. Использование кристаллов с низким акустическим затуханием позволяет увеличить диапазон рабочих частот. Необходимо заметить, что структуры на основе САР могут быть использованы и для определения материальных свойств подложек и для тонких пленок [2].

Использование СВЧ генераторов, управляемых напряжением, с низкими фазовыми шумами, работоспособных на нескольких гигагерцах, востребовано в радиолокации. Использование таких генераторов актуально для детектирования объектов с низкой эффективной площадью рассеяния. Однако к моменту начала работы отсутствовали надежные данные по исследованию высокодобротных САР на подложке из синтетического монокристалла алмаза. Зачастую попытки создать высокодобротный резонатор на алмазе представляли собой устройство, выполненное на алмазной CVD подложке, заведомо уступающей по качеству монокристаллу. Таким образом, создание высокодобротных генераторов с высокой добротностью и низкими фазовыми шумами является актуальной задачей акустоэлектроники.

**Цели и задачи работы.** Целью диссертации являлось изучение влияния упругой нелинейности на свойства кристаллов, включая влияние температуры и давления; комплексное исследование упругих свойств синтетического монокристалла алмаза как перспективного материала для составного акустического резонатора; изучение акустоэлектронных свойств резонатора, условий его эффективной работы; изучение особенностей СВЧ добротности и акустического затухания в монокристаллическом алмазе Па типа.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач:**

- развитие феноменологической теории температурной зависимости упругих постоянных 2-го порядка с учетом нелинейных модулей упругости 3-го и 4-го порядков;
- определение скоростей ОАВ и вычисление модулей УП2П синтетического монокристалла алмаза Па типа;
- расчет коэффициентов управления скоростей ОАВ алмаза под давлением, выбор системы уравнений для раздельного определения модулей УП3П;
- экспериментальное исследование зависимости скоростей ОАВ в ориентированных образцах алмазов от одноосного давления и вычисление модулей УП3П;
- исследование добротности как функции частоты для составного акустического резонатора на основе слоистой пьезоэлектрической структуры «Al/AlN/Mo/(100) алмаз»;
- анализ зависимости  $Q(f)$  резонатора, определение эффективных частотных областей возбуждения САР;
- определение вкладов в совокупное акустическое затухание в составном акустическом резонаторе с подложкой из синтетического монокристалла алмаза, изучение механизмов акустического затухания Ахиезера и Ландау-Румера.

**Исследования проводились с использованием высокоточного измерительного оборудования:** установки по измерению скоростей звука методом длинного импульса RITEC RAM-500, системы по измерению скоростей ОАВ импульсным эхо-методом, состоящей из осциллографа Tektronix DPO71254B и генератора Avtech AVRК-2-В, электро-механической испытательной машины INSTRON 5965, автоматизированной низкотемпературной магнитной системы Quantum Design EverCool 2, векторного анализатора цепей Agilent E5071C и рабочей станции М-150.

### **Научная новизна**

1. Проанализирована температурная зависимость модулей УП2П для кубических кристаллов. В расчёт впервые включены упругие постоянные высших порядков, а именно, модули упругости 4-го порядка (УП4П). Показано, что такое аналитическое представление значительно улучшает согласие с экспериментом.

2. Для синтетического монокристалла алмаза Па типа акустическим методом впервые определены модули УП3П.

3. Впервые экспериментально исследована частотная зависимость добротности составного акустического резонатора с подложкой из синтетического монокристалла алмаза Па типа ориентации (100). Наличие характерных максимумов и минимумов в частотной зависимости добротности объяснено с точки зрения поведения форм-фактора  $m$  тонкоплёночного пьезоэлектрического преобразователя. Показано, что для слоистой системы «внешний электрод/пьезопреобразователь/внутренний электрод/подложка» излучаемая

акустическая мощность  $W \sim |m|^2$ , и её частотная зависимость заключена в форм-факторе. Из изучения ряда экспериментальных данных показано, что частотные области с высокими значениями добротности можно связать с минимумами  $\text{Im}(m)$ , в то время как области с низким значением добротности ассоциируются с минимумами  $\text{Re}(m)$ .

4. Проанализированы частотная зависимость добротности составного акустического преобразователя на (100) алмазной подложке и вклады в акустические потери от различных механизмов. Показано, что основной вклад в акустические потери вносит относительно толстый кристаллический слой подложки.

5. Из исследования большой серии резонаторов было впервые 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  $Q \times f \approx 1,8 \cdot 10^4 \times f$  Гц. Получено, что согласование теоретических оценок с экспериментальными результатами соответствует частному параметру Грюнрайзена для продольной акустической моды  $\gamma_{100}^L \approx 0,85$ , а время термической релаксации фононов при комнатной температуре составило  $\tau_t \approx 1,6 \cdot 10^{-10}$  с.

**Работа выполнена по плану НИР ФГБНУ ТИСНУМ**, в том числе, в соответствии с Государственным контрактом № 16.513.12.3025 от 10 мая 2012 г. (Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»).

### **Научная и практическая значимость работы**

Полученные в данной диссертации результаты расширяют знания о температурном поведении упругих постоянных кристаллов, могут быть использованы в акустоэлектронных приборах и датчиках, СВЧ резонаторах и генераторах, при разработке эффективных сенсоров, работоспособных на частотах вплоть до  $\sim 10$  ГГц.

Так, уточнение температурной зависимости модулей УП2П может быть использовано для создания эффективных сенсоров температуры, более точного предсказания температурных сдвигов рабочих частот и ориентации термостабильных срезов.

Данные по влиянию одноосного давления на изменение скоростей ОАВ монокристалла алмаза, наряду с полученными модулями УП3П, могут быть использованы для создания эффективных сенсоров сверхвысоких давлений. Результаты данной работы могут быть использованы для более точного учета сдвига рабочей частоты в зависимости от давления, а также для построения кривой «напряжение – деформация» в алмазе для любого избранного кристаллографического направления.

Экспериментально полученные АЧХ резонаторов на СВЧ в сочетании с высокими значениями параметра качества  $Q \times f$  синтетического монокристалла алмаза Па типа свидетельствуют о возможности создания высокодобротных акустических микрорезонаторов,

работоспособных на частотах вплоть до  $\sim 10$  ГГц. На отдельных образцах САР наблюдались резонансы на частотах вплоть до 20 ГГц с добротностью  $\sim 3300$ . Данный результат в будущем может быть отправной точкой для дальнейшего повышения рабочих частот акустоэлектронных устройств.

Экспериментально исследована температурная зависимость обертонов САР. Полученные значения ТКЧ для обертонов, возбуждаемых на 500 – 1000 МГц, оказались равными  $(-4,5 \dots -6,5) \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ . В окрестности комнатных температур наблюдались близкие к линейной зависимости добротности обертонов от температуры.

Обнаруженный переход смены режима затухания от механизма Ахиезера к механизму Ландау-Румера означает, что на частотах более 1 ГГц добротность алмаза не падает с ростом частоты, а оказывается примерно постоянной. Данный эффект делает алмаз потенциально значимым материалом акустоэлектроники на СВЧ, так как подобный эффект может достигаться в других известных кристаллах лишь на значительно более высоких частотах, а в исследованном диапазоне 1 ... 20 ГГц приводит, в соответствии с механизмом Ахиезера, к обратно пропорциональной зависимости добротности от частоты.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Учет модулей упругости 3-го и 4-го порядков приводит к уточнению феноменологической теории температурной зависимости модулей упругости и улучшает согласие теоретических оценок по кубическим кристаллам с экспериментальными данными.
2. Изменения скоростей ОАВ синтетического монокристалла алмаза Па типа в пределах от 0 до 450 МПа имеют линейный характер, коэффициенты управления скоростями ОАВ лежат в диапазоне от  $-2,4 \cdot 10^{-12}$  до  $-22,7 \cdot 10^{-12}$  Па $^{-1}$ . Величины коэффициентов тензора упругих постоянных 3-го порядка равны  $C_{111} = -7660 \pm 650$ ,  $C_{112} = -1550 \pm 350$ ,  $C_{123} = -3470 \pm 700$ ,  $C_{144} = -3130 \pm 700$ ,  $C_{155} = -2630 \pm 500$ ,  $C_{456} = -700 \pm 300$  (ГПа).
3. Особенности частотной зависимости форм-фактора  $|m|^2$  и пиков его мнимой и действительной частей определяют частотные области эффективной работы тонкоплёночного пьезоэлектрического преобразователя в составном акустическом резонаторе.
4. Синтетический монокристалл алмаза Па типа имеет высокую добротность в широкой СВЧ области (на 1 ГГц  $Q = 33000$  и  $\alpha(f) \approx 0,8$  дБ/см; на 9,5 ГГц  $Q = 10800$  и  $\alpha(f) \approx 9$  дБ/см).
5. В синтетическом монокристалле алмаза Па типа смена режимов затухания от механизма Ахиезера к механизму Ландау-Румера происходит в окрестности частоты 1 ГГц (при комнатной температуре), при этом  $Q \times f_{\text{Ахиезер}} \approx 1,8 \cdot 10^{13}$  Гц,  $Q \times f_{\text{Л-Р}} \approx 1,8 \cdot 10^4 \times f$  Гц. Частный параметр Грюнайзена и время термической релаксации фононов имеют значения  $\gamma_{100}^L \approx 0,85$  и  $\tau_t \approx 1,6 \cdot 10^{-10}$  с соответственно.

**Личный вклад соискателя.** Соискатель выполнил теоретические расчеты температурных коэффициентов УП2П тетрагональных, гексагональных и тригональных кристаллов, развил теорию расчета температурных коэффициентов УП2П для кубических кристаллов, включив в рассмотрение учет упругих постоянных 4-го порядка. Определил коэффициенты управления для кубических кристаллов под действием одноосного механического напряжения. Соискатель принимал участие в подготовке образцов, производил экспериментальные измерения скоростей звука кристаллов алмаза и их зависимости от одноосного давления, на основе экспериментальных данных выполнял расчёты модулей УП3П алмаза. Принимал активное участие в экспериментальном и теоретическом исследовании составного акустического резонатора на подложке из синтетического монокристалла алмаза: выполнил моделирование АЧХ САР, анализировал полученные данные по частотным зависимостям коэффициентов отражения  $S_{11}$  и импеданса, исследовал воздействие температуры на частоты обертонов. Принимал активное участие в анализе полученных результатов.

**Достоверность результатов** обусловлена использованием высококачественных монокристаллов алмаза IIa типа, выращенных на затравке методом температурного градиента в условиях высоких температур и давлений (в англоязычной литературе High Pressure High Temperature – HPHT) в ФГБНУ ТИСНУМ. Для исследования акустических свойств кристаллов и слоистых структур использовались высокоточные методы, такие как метод длинного импульса или импульсный эхо-метод. Ошибка экспериментальных данных оценивалась методом наименьших квадратов. При получении модулей УП3П использовали систему линейных переопределённых уравнений, поскольку выбранные для исследований направления распространения и типы мод, а также варианты приложения одноосных давлений допускали наличие проверочных уравнений. Достоверность полученных выводов следует из согласия экспериментальных результатов по большому набору образцов САР с различной геометрией подложек и топологией электродов с теоретическими расчетами и предположениями.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

- IEEE Int. Joint Conf. of the Frequency Control and the European Frequency and Time Forum, San-Francisco, USA, 2-5 May, 2011;
- 54-ая научная конф. МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе», Долгопрудный, Россия, 10–30 ноября 2011;
- «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия российского акустического общества», Таганрог, Россия, 17-20 сентября, 2012;



- 8-ая Межд. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», Троицк, Россия, 25-28 сентября, 2012;
- The 2012 IEEE Int. Ultrasonics Symp., Dresden, Germany, 7-10 October, 2012;
- The 2013 Joint Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, European Frequency and Time Forum and Piezoelectric Force Microscopy workshop Symp., Prague, Czech Republic, 21-25 July, 2013;
- Всеросс. научно-техническая конф. и выставка, посвященной итогам реализации Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы», Москва, Россия, 24-25 сентября 2013;
- Школа-семинар молодых учёных Центрального региона по теме: «Участие молодых учёных в фундаментальных, поисковых и прикладных исследованиях по созданию новых углеродных и наноуглеродных материалов», Андреевка, Россия, 2-3 октября 2013;
- Межд. симп. "Физика кристаллов 2013", Москва, Россия, 28 октября - 2 ноября 2013;
- Int. Conf. on Diamond and Carbon Materials, Madrid, Spain, 8-11 September, 2014;
- IEEE Int. Frequency Control Symp. and European Frequency and Time Forum, Denver, USA, 12-16 April, 2015.

**Публикации.** Всего в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, опубликовано 6 статей, 3 статьи опубликованы в журналах, индексируемых в поисковой платформе Web of Science. Представлено 12 докладов на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях, 6 статей опубликованы в трудах соответствующих симпозиумов и конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения, Списка литературы из 170 наименований и Приложения. Основная часть работы изложена на 160 страницах, содержит 69 рисунков и 24 таблицы.

#### **Основное содержание диссертации**

**Во введении** кратко сформулированы актуальность, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, отражён личный вклад соискателя, указано соответствие выполненной работы плану НИР ФГБНУ ТИСНУМ, обоснована достоверность результатов, указана апробация работы, кратко изложено содержание глав диссертации.

**В первой главе (обзор)** приводится теоретическая модель распространения акустических волн в кристаллах и слоистых структурах, в том числе, в условиях конечных внешних воздействий. Вводятся термодинамические потенциалы, рассматриваются линейные и

нелинейные упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические свойства кристаллов. Представлен обобщенный закон Гука в следующем виде:

$$\tau_{AB} = C_{ABCD} \eta_{CD} + \frac{1}{2} C_{ABCDPQ} \eta_{CD} \eta_{PQ} + \frac{1}{6} C_{ABCDPQKL} \eta_{CD} \eta_{PQ} \eta_{KL} + \dots, \quad (1)$$

где  $\tau_{AB}$  – тензор термодинамических напряжений,  $\eta_{CD}$  – тензор деформаций,  $C_{ABCD}$ ,  $C_{ABCDPQ}$ ,  $C_{ABCDPQKL}$  – соответственно упругие постоянные 2-го, 3-го и 4-го порядка.

Рассмотрено уравнение движения частиц упругой среды в представлении естественной, промежуточной и текущей конфигураций упругой среды, подвергнутой конечному внешнему воздействию. Показано, что распространение объемных акустических волн (ОАВ) в кристаллах удобно анализировать, решая уравнения Грина-Кристоффеля. Описывается поток энергии упругих волн, исследуются основные типы акустических волн в слоистых структурах. Показывается, что в случае приложения давления уравнение и тензор Грина-Кристоффеля модифицируются. Таким образом, необходим точный учет возникающих линейных по воздействию добавок. Так, в случае приложения внешнего давления удобно использовать коэффициенты управления скоростями ОАВ  $\alpha_v$  при воздействии давления.

В первой главе исследуется частотная зависимость мощности излучения для пьезоэлектрической слоистой структуры Me1/AlN/Me2/подложка. Показано, что частотную зависимость излучаемой мощности  $W$  можно выразить через форм-фактор  $m$ :  $W \sim |m|^2$ . В таком случае анализ частотных зависимостей  $W$  сводится к исследованию форм-фактора  $m$  нагруженного тонкоплёночного пьезоэлектрического преобразователя. Для исследования таких частотных особенностей доцентом Сибирского федерального университета, к.ф.-м.н. Бурковым С.И. была написана программа NBAR ver. 2.3. Приводится подробное описание данной программы. Так, особенности возбуждения объемных резонансов, частотных областей эффективной работы резонатора можно исследовать, изучая частотные зависимости самого форм-фактора  $m$ , его реальной и мнимой частей.

Описаны механизмы фонон-фононного затухания Ахиезера и Ландау-Румера, реализуемые на различных частотах. Так, механизм затухания Ахиезера соответствует относительно низким частотам и/или высоким температурам  $2\pi f \tau_t < 1$ , где  $\tau_t$  – время термической фонон-фононной релаксации. Механизм затухания Ландау-Румера реализуется при больших частотах и/или низких температурах, когда выполняется  $2\pi f \tau_t > 1$ . Относительно низкочастотный механизм Ахиезера характерен квадратичной зависимостью коэффициента затухания  $\alpha(f)$  по частоте и отсутствием частотной зависимости параметра качества  $Q \times f$  ( $\alpha(f) \sim f^2$ ,  $Q \times f \approx \text{const}$ ) [3]. Для механизма затухания Ландау-Румера наблюдается линейная частотная зависимость коэффициента затухания и параметра качества ( $\alpha(f) \sim f$ ,  $Q \times f \sim f$ ) [3]. Показано, что в таких выражениях присутствует квадратичная зависимость от параметра

Грюнайзена  $\gamma$  (ПГ). Показана разница между частным параметром и параметром Грюнайзена. Детально исследуются различные способы определения ПГ. Показано, что различные способы вычисления ПГ влекут за собой заметный разброс этой величины. Так, для алмаза можно получить  $\gamma = 0,74 \dots 1,54$ .

Рассмотрены основные типы акустических резонаторов и акустических колебаний, используемых в них.

**Вторая глава** посвящена изучению теоретических зависимостей упругих постоянных кристаллов от температуры. Рассматривается вариант упрощенной феноменологической теории, базирующейся на представлении о конечных статических деформациях  $\eta_{AB} = \alpha_{AB}\Delta T$ , которые возникают в твердом теле при тепловом расширении ( $\alpha_{AB}$  – тензор температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР)). Был получен модифицированный тензор Грина-Кристоффеля, компоненты которого зависели от температуры, затем решалась задача на собственные значения и собственные векторы тензора Грина-Кристоффеля в определённых кристаллографических направлениях и были получены температурные коэффициенты  $dC_{BC}/dT$  модулей УП2П тригональных, тетрагональных и гексагональных кристаллов. Используя полученные выражения для тригональных ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), гексагональных ( $\text{Zn}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Er}$ ) и тетрагональных ( $\text{TeO}_2$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) кристаллов, рассчитаны значения  $dC_{BC}/dT$ . Для примера, сравнение рассчитанных значений  $dC_{BC}/dT$  для тригональных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{SiO}_2$  с экспериментальными данными приведено в табл. 1. Наблюдается хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных.

Для кубических кристаллов произведено дальнейшее уточнение температурной зависимости упругих постоянных 2-го порядка. Сначала была включена в рассмотрение температурная зависимость в тензоре ТКЛР вида:  $\alpha_{PQ}^*(T) = \alpha_{PQ} + \beta_{PQ}\Delta T$ , где  $\alpha_{PQ}$  – независимая от температуры часть ТКЛР, а  $\beta_{PQ}$  определяет линейную по температуре поправку.

Учитывая не только модули УП3П, но и упругие постоянные 4-го порядка, выражение для тензора Грина-Кристоффеля примет вид:

$$\Gamma_{BC}(\bar{\tau}) = \left\{ C_{ABCD}^S + (C_{ABPD}^S \delta_{CQ} + C_{ABCDPQ}^S) \alpha_{PQ} \Delta T + \right. \\ \left. + \left[ (2C_{ABPD}^S \delta_{CQ} + C_{ABCDPQ}^S) \beta_{PQ} \Delta T + (2C_{ABMDPD}^S \delta_{CN} + C_{ABCDPQMN}^S) \alpha_{PQ} \alpha_{MN} \Delta T^2 \right] \right\} N_A N_D. \quad (2)$$

Здесь  $N_A$  – единичный вектор направления распространения ОАВ. Решая задачу на собственные значения и собственные векторы тензора Грина-Кристоффеля (2) в кристаллографических направлениях [100] и [110], были получены температурные коэффициенты  $dC_{BC}/dT$  для кубических кристаллов. Представляя эффективные упругие постоянные в виде  $C_{BC}(\Delta T) = C_{BC}(\Delta T) + TC_{BC} \cdot \Delta T + T^2 C_{BC} \cdot \Delta T^2$ , было произведено сравнение вычисленных в

данной работе значений  $TC_{BC}$  и  $T^2C_{BC}$  с экспериментальными данными по ряду кубических кристаллов.

Выбор исследуемых кристаллов был ограничен наличием известных модулей УП4П и коэффициентов  $\beta_{PQ}$ . Так, были произведены сравнения теоретических и экспериментальных данных для кубических кристаллов NaCl, KCl, KBr, NaBr, KF, AgCl, Au, Ag.

Таблица 1. Сравнение расчетных и экспериментальных температурных зависимостей тригональных кристаллов LiNbO<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>

$dC_{BC}/dT$ , $10^6$ Па/К	LiNbO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>	
	Расчет [4]	Эксп. [5]	Расчет [6]	Эксп. [7]
$dC_{11}/dT$	-39,0	-34,6	-4,9	-4,2
$dC_{33}/dT$	-21,1	-36,8	-13,0	-16,9
$dC_{44}/dT$	-18,2	-12,2	-4,0	-9,9
$dC_{66}/dT$	-12,8	-10,3	2,1	7,0
$dC_{14}/dT$	5,1	-1,7	-2,7	-1,8

Для данных кристаллов производится попытка учесть т.н. “фононное давление”, как было сделано в работе [8], путем внесения изменений в температурную зависимость упругих постоянных.

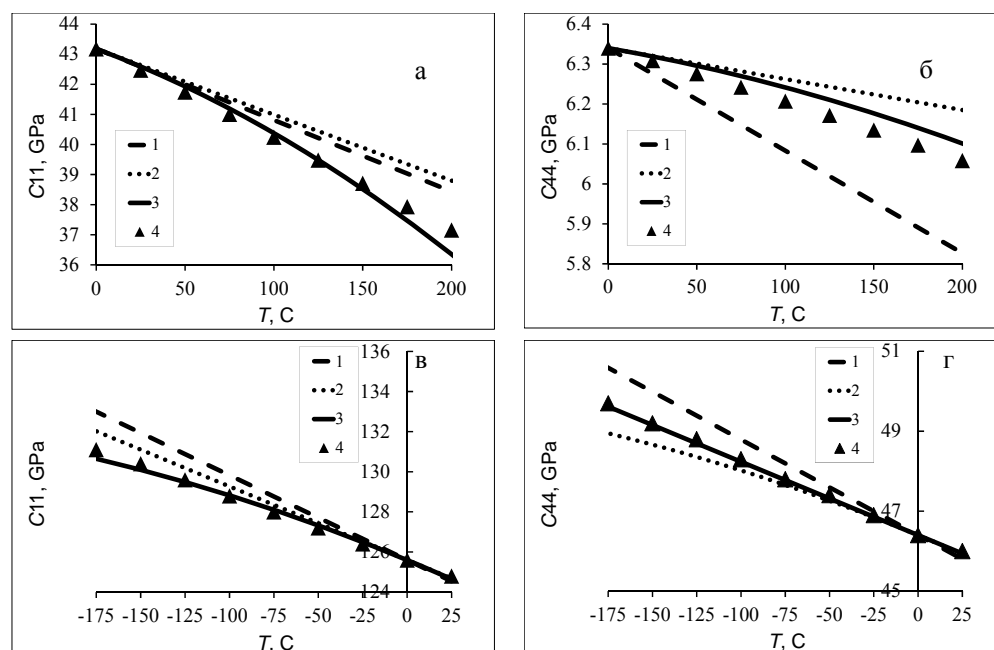


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные зависимости упругих постоянных  $C_{11}$  и  $C_{44}$  кристаллов KCl (а, б) и Ag (в, г). 1 – линейная зависимость в модели Шриваставы [8]; 2 – расчетная зависимость в линейном приближении; 3 – нелинейная температурная зависимость с учетом модулей УП4П; 4 – экспериментальные значения по температурным зависимостям упругих постоянных монокристаллов KCl [9] и Ag [10]

Показано, что хотя учет фонового давления для некоторых кристаллов и имеет смысл, однако использование данной модели для всех исследуемых кристаллов оказывается неадекватным с точки зрения соответствия расчетных результатов с экспериментальными. На рис. 1 наглядно продемонстрированы преимущества учета квадратичной

поправки по температуре для температурной зависимости модулей  $C_{11}$  и  $C_{44}$  кристаллов KCl и Ag. Наилучшее согласие с экспериментом демонстрируют кривые, полученные с учетом вклада УП4П.

**В третьей главе** исследуются линейные и нелинейные упругие свойства синтетического монокристалла алмаза Па типа.

Таблица 2. Экспериментальные значения ОАВ в синтетическом монокристалле алмаза Па типа ( $T_{\text{комн}}$ )

$N$	$U$	Тип волны	$\rho v^2$	$v$ , м/с
[100]	[100]	L	$C_{11}$	$17542 \pm 4$
	$\perp[100]$	S	$C_{44}$	$12828 \pm 3$
[110]	[001]	$S_1$	$C_{44}$	$12829 \pm 3$
	$[1\bar{1}0]$	$S_2$	$\frac{1}{2}(C_{11}-C_{12})$	$11659 \pm 2$
	[110]	L	$\frac{1}{2}(C_{11}+C_{44}+2C_{12})$	$18333 \pm 4$

Произведен анализ распространения упругих волн в кристаллах симметрии  $m3m$ . В экспериментальных исследованиях использованы метод длинного импульса и импульсный эхо-метод. Так как метод длинного импульса чувствителен к частоте, измерения проводились на рабочих частотах, превышающих 140 МГц. Представлена экспериментальная установка, описано качество исследуемых кристаллов и образцов алмаза. Экспериментально определенные скорости ОАВ приведены в табл. 2. Значения скоростей ОАВ, опреде-

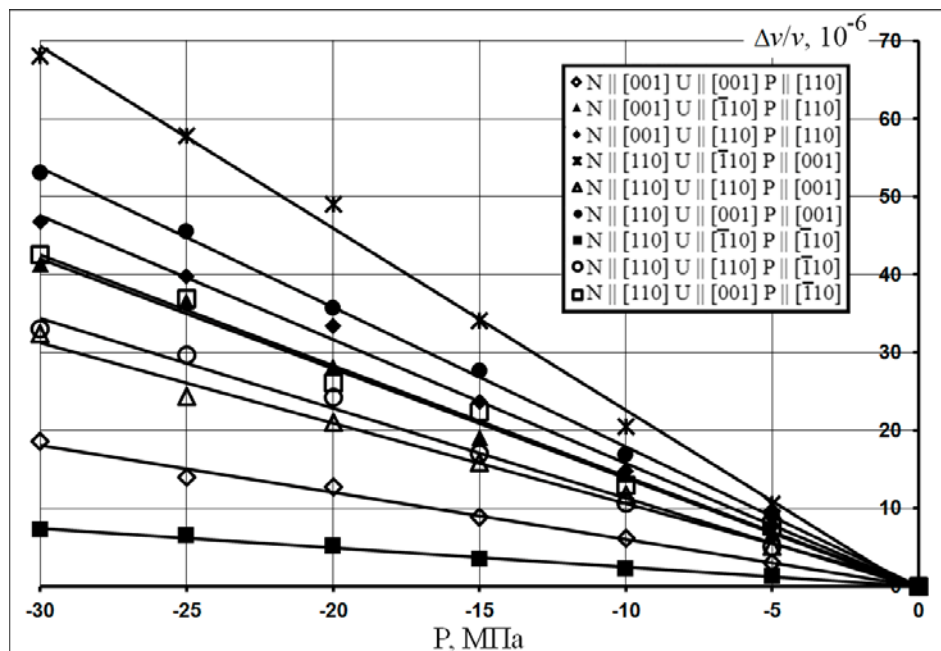


Рис. 2. Зависимость  $\Delta v/v$  от давления различных акустических мод синтетического монокристалла алмаза

ленных обоими экспериментальными методами, совпали с точностью до погрешности. Используя экспериментально определенные скорости, были получены все независимые коэффициенты УП2П синтетического монокристалла алмаза Па типа (табл. 3). Наблюдается хорошее соответствие полученных результатов с данными других авторов.

В приближении линейности зависимости скоростей ОАВ от давления был записан модифицированный тензор Грина-Кристоффеля, получены его собственные значения как функции от давления и представлена система линейных неоднородных уравнений относительно 6-ти неизвестных коэффициентов УП3П (для кристаллов симметрии  $m3m$ ).

В правой части системы стоят коэффициенты управления скоростью ОАВ под давлением, которые вычислялись как тангенсы углов наклона экспериментальных зависимостей  $\Delta v/v = f(P)$ . Получены аналитические выражения для коэффициентов управления акустических мод. Для определения модулей УПЗП синтетического монокристалла алмаза Па типа была проведена серия экспериментов по изучению зависимости относительного изменения скоростей звука от величины внешнего одноосного давления. Экспериментально исследовались зависимости скоростей ОАВ от одноосного сжатия в различных кристаллографических направлениях для ряда акустических мод, имеющих различные направления распространения и поляризации.

Для всех исследуемых мод в широком диапазоне прилагаемых давлений (от 0 до 450 МПа) наблюдалась линейная зависимость изменения скоростей акустических волн от величины прилагаемого давления. Экспериментальные зависимости относительных изменений скоростей ОАВ в синтетическом монокристалле алмаза Па типа приведены на рис. 2. Используя полученную систему линейных уравнений, были определены значения всех независимых коэффициентов УПЗП алмаза Па типа (табл. 4). Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с данными других авторов, однако имеются некоторые расхождения в коэффициентах  $C_{123}$  и  $C_{144}$ .

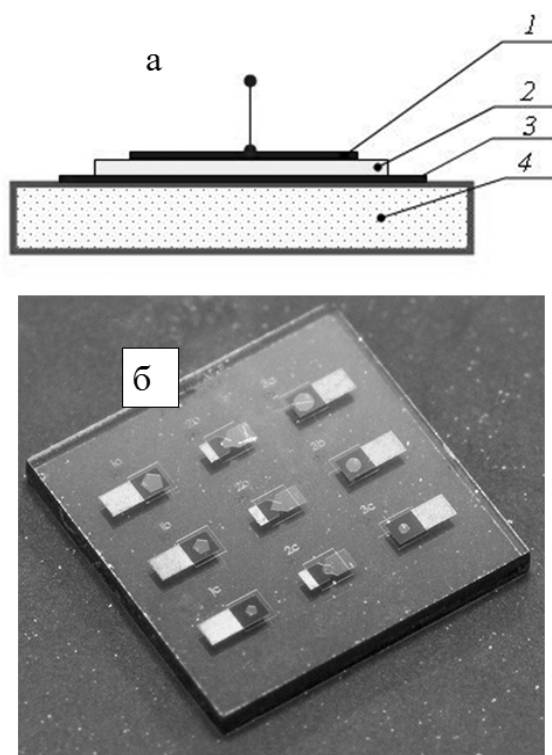


Рис. 3. а – общий вид резонатора на объёмных акустических волнах: 1 – внешний электрод, 2 – пьезоэлектрическая плёнка, 3 – внутренний электрод, 4 – подложка; б – набор из 9-ти САР А №29

В четвертой главе исследуется составной акустический резонатор с подложкой из синтетического монокристалла алмаза Па типа. Типичная структура такого САР и фотография одного из исследуемых образцов приведены на рис. 3. С.н.с. ФГБНУ ТИСНУМ В.С. Бормашовым методом дифракции обратно рассеянных электронов (Electron Back Scattering Diffraction – EBSD) наблюдались Кикучи-линии, исследуя которые, можно оценить глубину нарушенного слоя в монокристалле алмаза. Показано, что глубина такого слоя в исследуемых образцах не превышала 30 нм, независимо от качества полировки. Данное значение было использовано для оценки акустического поглощения в нарушенном слое. В экспериментальных исследованиях была использована серия образцов САР с толщинами пленок различных металлических электродов от 100 до 250 нм, толщиной пьезоэлектрической пленки AlN от 0,6 до 3,2 мкм, толщ

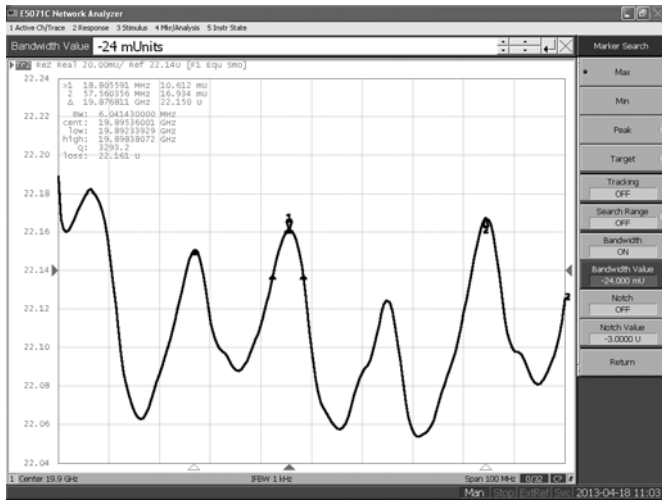


Рис. 4. Частотная зависимость параметра  $Z_{11}$  в исследуемом САР А №11.3. Серия эквидистантных резонансов вблизи частоты 19,9 ГГц,  $Q \approx 3300$

в исследованиях толщин Al электрода  $180 (200 \pm 50)$  нм, слоя AlN –  $3200 (3100 \pm 100)$  нм, Mo электрода –  $200 (150 \pm 50)$  нм. В скобках указаны соответствующие значения толщин, измеренные методом РЭМ на поперечном срезе образца-спутника. Специальное внимание уделялось положению локальных максимумов и минимумов на частотных зависимостях фактора, зависящих от толщины и материала электродов. СВЧ исследования составных акустических резонаторов производились с помощью экспериментальной установки, в состав которой входил векторный анализатор цепей E5071C-2K5 (300 кГц – 20 ГГц) и зондовая станция M-150.

Исследования проводились в режиме «на отражение». Частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  и импеданса  $Z_{11}$  были детально исследованы в интервале частот 0,5 – 10 ГГц. Анализировались АЧХ и ФЧХ, диаграмма Смита. В силу особенностей измерений резонансных свойств составных акустических резонаторов на отражение наблюдались резонансные пики, соответствующие только параллельному резонансу (антирезонансу).

Таблица 3. Сравнение полученных модулей УПЗП (ГПа) синтетического монокристалла алмаза с данными других работ

УПЗП	[11]	Наши данные
$C_{11}$	1079	$1081,9 \pm 1,0$
$C_{44}$	124	$125,2 \pm 0,8$
$C_{12}$	578	$579,6 \pm 0,2$

ной алмазной подложки от 0,3 до 1,2 мм.

Используя программу NBAR ver. 2, было произведено математическое моделирование с целью оптимизации конструкции составных акустических резонаторов на основе сверхтвёрдых синтетических монокристаллов. Показано, что с точки зрения эффективности САР наиболее предпочтительной оказывается структура «Al/AlN/Mo/(100) алмаз». Показано, что наиболее точно расчётная частотная зависимость полосы пропускания соответствует эксперименту для образца А №9 при значе-

Таблица 4. Модули УПЗП (в ГПа) синтетического монокристалла алмаза ( $T_{\text{комн}}$ )

	[12]	[13]	Наши данные
$C_{111}$	-6475	$-7603 \pm 600$	$-7660 \pm 650$
$C_{112}$	-1947	$-1909 \pm 554$	$-1550 \pm 350$
$C_{123}$	982	$835 \pm 1447$	$3470 \pm 700$
$C_{144}$	115	$1438 \pm 853$	$-3130 \pm 700$
$C_{155}$	-2998	$-3938 \pm 375$	$-2630 \pm 500$
$C_{456}$	-135	$-2316 \pm 743$	$-700 \pm 300$

Добротность определялась как отношение частоты обертона к полосе пропускания  $\delta f$ , измеренной на уровне -3 дБ по импедансу. Для экспериментального исследования влияния температуры использовалась установка Quantum Design EverCool 2. Экспериментальный образец САР устанавливался в измерительную ячейку для температурных исследований. Температурные испытания и исследования зависимостей величин  $\Delta f = f(T)$ ,  $Q = f(T)$  проводились в заданном интервале температур с шагом  $\Delta T = 10^\circ$ , для чего в избранных температурных точках производилась стабилизация температуры образца с точностью  $\pm 0,1^\circ$  в течение 5 мин. На САР серии А №11.3 были обнаружены объемные резонансы на рекордных значениях частоты. Так, например, для одной из первых исследованных структур А №11.3 наблюдался сигнал вплоть до частот  $\sim 20$  ГГц (рис. 4). Добротность

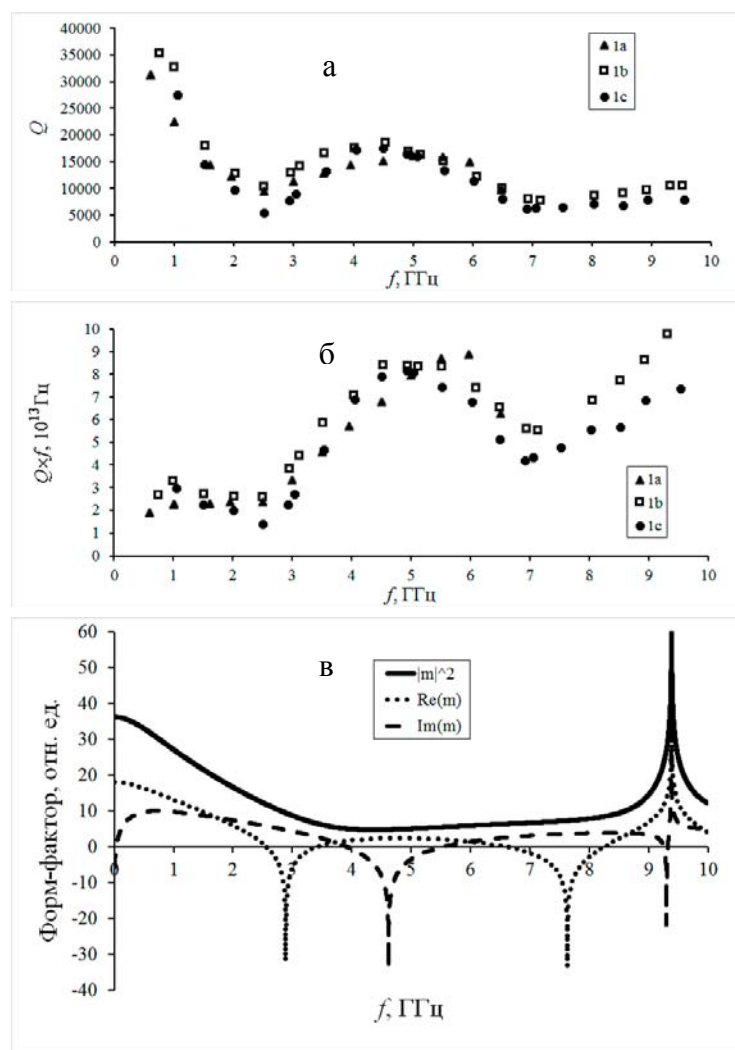


Рис. 5. Частотные зависимости добротности  $Q$  (а), параметра качества  $Q \times f$  (б) и форм-фактора (в) для резонаторов 1а, 1b и 1с образца А №29

ответствуют оптимальным частотным областям возбуждения обертонов в алмазной подложке.

такого резонатора на частоте 19,9 ГГц составила около 3300. Для всех исследуемых экспериментальных образцов САР были произведены измерения добротности объемных резонансов как функция частоты.

На рис. 5 представлена частотная зависимость добротности  $Q$ , параметра качества  $Q \times f$  и форм-фактора для САР А № 29. Наблюдаются характерные области с локальными минимумами и максимумами добротности и параметра качества, заметна тенденция к росту параметра качества при повышении рабочей частоты. Используя результаты моделирования, характерные минимумы действительной части форм-фактора  $Re(m)$  были связаны с частотными областями, где добротность составного акустического резонатора уменьшается вследствие собственных резонансов в тонкоплёночном преобразователе ( $\sim 1/4\lambda$ ,  $\sim 3/4\lambda$ , ...), в то время как минимумы мнимой части  $Im(m)$  со-



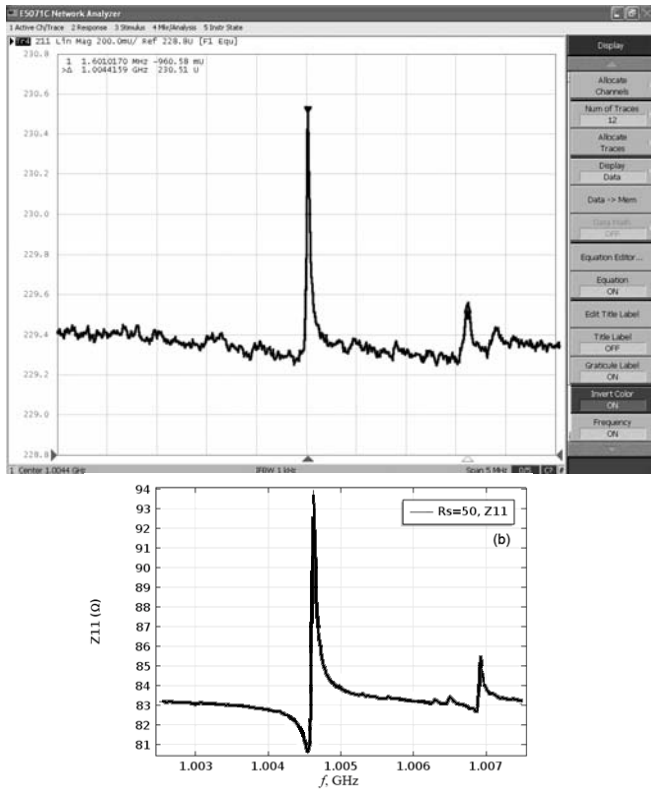


Рис. 6. а – экспериментальные результаты АЧХ коэффициента  $S_{11}$  составного акустического резонатора А №29 на частоте 1 ГГц ( $Q \approx 23000$ ); б – результаты моделирования структуры, аналогичной САР А №29

Таблица 5. ТКЧ исследуемых САР

Образец	$f$ , МГц	ТКЧ, $10^{-6}$ град $^{-1}$
А №9	596,028	-4,53
	612,718	-4,63
А №12.1	1101,328	-6,14
	1063,420	-6,54
А №14	722,325	-4,50
	751,273	-4,84

Критериями надежности результатов моделирования были как совпадение частот объемного обертона и побочного резонанса, так и количественное совпадение расчетной добротности, которое должно максимально соответствовать экспериментальным данным. Экспериментально определенная добротность обертона на частоте 1 ГГц составляла 23000.

Результат моделирования аналогичной структуры на частоте 1 ГГц показывает значения добротности 22000, что достаточно хорошо совпадает с экспериментом. Положение побочного резонанса меняется в зависимости от ширины внешнего электрода: чем шире

Сравнивая поведение различных расчётных кривых форм-фактора с экспериментом, можно указать на хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных как для образца А №29, так и для других исследованных образцов.

Было исследовано влияние температуры на частоты обертонов САР. Измерялась температурная зависимость смещения рабочей частоты  $\Delta f$ . Были исследованы экспериментальные образцы А №9, А №12.1 и А №14. Полученные температурные коэффициенты частоты (ТКЧ) для обертонов с частотами 500 – 1100 МГц оказались равны  $(-4,5 \dots -6,5) \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$  (табл. 5). Исследованная температурная зависимость добротности близка к линейной. В образцах САР экспериментально наблюдались паразитные пики, возникающие рядом с объемным резонансом (рис. 6). С целью идентификации данных паразитных пиков было произведено моделирование распространения акустических волн в слоистой структуре. Использовалась конечно-разностная схема, написанная на MatLab к.ф.-м.н., с.н.с. ФГБНУ ТИСНУМ Квашниным Г.М. Была проанализирована структура, аналогичная САР А №29, однако ширина верхнего электрода из Al варьировалась.

Критериями надежности результатов модели-

электрод, тем ближе побочный пик к объемному резонансу. В пределе идеального резонатора, когда ширина его слоев стремится к бесконечности (ширина напыленных слоев электродов и пьезоэлектрика совпадает с шириной алмаза), побочный пик сливается с объемным резонансом (можно говорить о его исчезновении). Детально анализируя смещения по толщине исследуемой структуры, серия побочных резонансов была идентифицирована как набор антисимметричных и симметричных мод различных порядков, соответствующих нормальным волнам в пластинке (волны Лэмба).

Было проанализировано затухание акустических волн в составном акустическом резонаторе. Показано, что затухание складывается из фонон-фононного затухания в подложке, затухания в пьезоэлектрической пленке и на её поверхности, рассеяния энергии на шероховатостях поверхности алмаза, акустических и электрических потерь в слоях металлических электродов, рассеяния упругих волн в нарушенном слое подложки.

Показано, что вклад в затухание акустических потерь на шероховатости исследуемых образцов оказывается меньше, чем вклад фонон-фононного затухания в механизме Ландау-Румера. Оценки показали, что влиянием нарушенного слоя (~30 нм) также можно пренебречь.

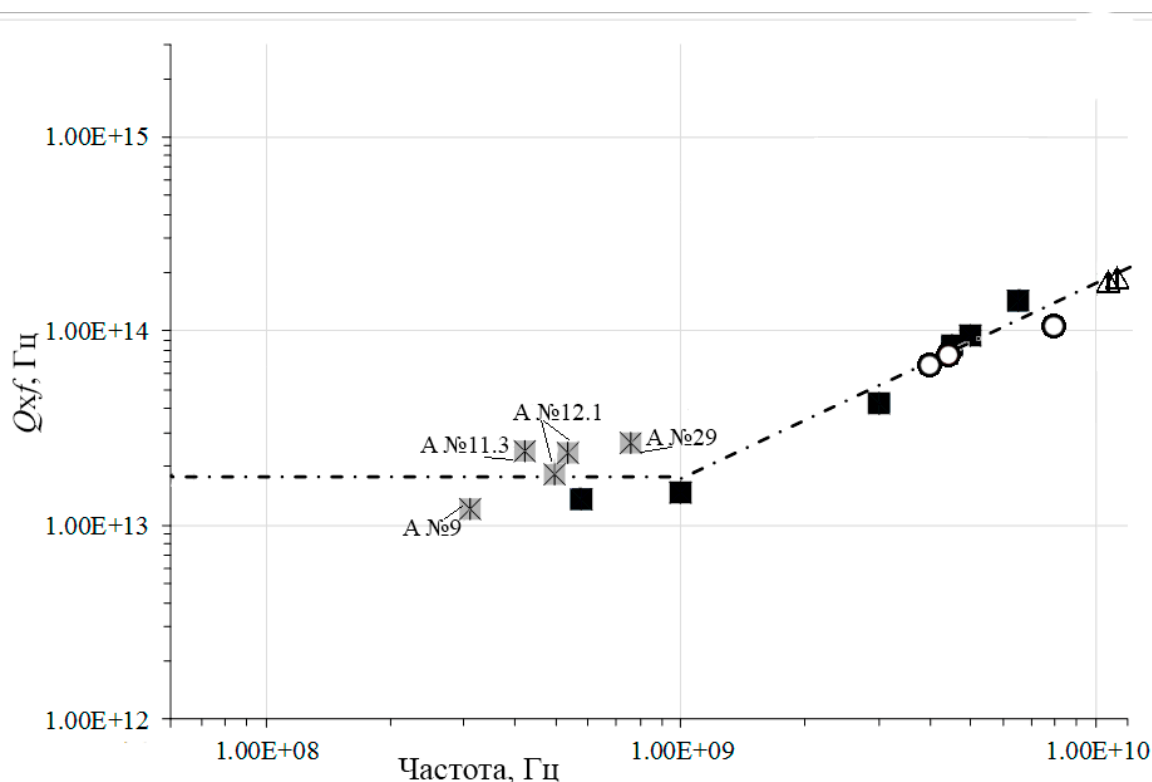


Рис. 7. Экспериментальные частотные зависимости параметра качества  $Q \times f$  для набора САР на основе алмаза. Черным квадратом обозначены значения для САР А №28, кругом – САР А №24, треугольником – САР А №25

Исследуя частотную зависимость параметра качества серии образцов, обнаружена смена частотной зависимости параметра качества: ниже частоты  $\sim 1$  ГГц выполняется  $Q \times f = \text{const}$ , выше происходит линейный рост  $Q \times f$  с увеличением рабочей частоты  $f$  (рис. 7). Такое поведение параметра качества можно объяснить как сменой режима фонон-фононного затухания с механизма Ахиезера на механизм Ландау-Румера в окрестности 1 ГГц при комнатной температуре. Показано, что для механизма Ахиезера справедливо  $Q \times f \approx 1,8 \cdot 10^{13}$  Гц и  $\alpha(f) \approx 0,9 \times f^2$  дБ/см $\times$ ГГц<sup>2</sup>, в то время как для механизма Ландау-Румера выполняется  $Q \times f \approx 1,8 \cdot 10^4 \times f$  Гц и  $\alpha(f) \approx 0,9 \times f$  дБ/см $\times$ ГГц. Вычислено время термической фонон-фононной релаксации  $\tau_t = 1,6 \cdot 10^{-10}$  с (при комнатной температуре). Для продольной волны в направлении [100] алмаза получен частный параметр Грюнайзена  $\gamma_{100}^L = 0,85$ .

### **Основные результаты и выводы**

- Предложена теория температурных зависимостей УП2П с учетом вкладов модулей упругости 3-го и 4-го порядка кубических кристаллов. Показано качественное и количественное согласование с экспериментальными данными в области комнатных температур для ряда кристаллов;
- Исследована зависимость скоростей ОАВ синтетического монокристалла алмаза Па типа от одноосного сжатия. Экспериментально определены значения модулей упругих постоянных 3-го порядка;
- Экспериментально исследован составной акустический резонатор на основе слоистой пьезоэлектрической структуры «Al/AlN/Mo/(100) алмаз» в области частот 800 МГц – 10 ГГц;
- Дальнейшая оптимизация конструкции и технологии изготовления позволит продвинуться и в область более высоких частот, поскольку с ростом частоты наблюдается немонотонное возрастание параметра качества;
- Показано, что немонотонный характер частотных зависимостей параметров резонатора связан с особенностями возбуждения нагруженного тонкопленочного преобразователя в окрестности частот  $(\lambda/4)n$ ;
- Наилучшие результаты с точки зрения добротности и параметра качества резонатор демонстрирует в окрестности минимума мнимой части форм-фактора  $\text{Im}(m)$ . Результаты расчета находятся в близком согласии с экспериментально наблюдаемыми зависимостями;
- Исследованы особенности возбуждения паразитных пиков, связанных с волнами Лэмба в слоистой структуре;
- Подробно проанализированы механизмы потерь акустической энергии в слоистой пьезоэлектрической структуре «Al/AlN/Mo/(100) алмаз». Использована оценка глубины нарушенного приповерхностного слоя ( $\sim 20 - 30$  нм) в алмазе после финишной абразивной

обработки, обоснованная методом дифракции обратно рассеянных быстрых электронов и наблюдением Кикучи-линий;

- Показано, что потери акустической энергии на неровностях поверхности алмазной подложки при шероховатости  $\sim 30$  нм, так же, как акустические потери в тонких плёнках, на порядок меньше акустического затухания в объёме и принципиального значения не имеют;
- Неровности внешней поверхности пьезоэлектрической плёнки AlN могут дать вклад, сравнимый с объёмным затуханием в подложке. Также важно, что такой вклад возрастает с ростом частоты  $\sim f^2$ . Поэтому, используя экспериментальные данные АСМ, учитывали вклад данного механизма в совокупный эффект;
- Показано, что частота перехода от механизма Ахиезера к механизму Ландау-Румера в алмазе составляет  $\sim 1$  ГГц;
- Получено, что для алмаза время термической фонон-фононной релаксации  $\tau_t = 1,6 \cdot 10^{-10}$  с, и частный параметр Грюнайзена для продольной акустической волны в направлении [100] равен 0,85;
- Расчёт акустического затухания показал, что, хотя на частоте  $\sim 1$  ГГц акустические потери в алмазе несколько выше, но при увеличении частоты до 8 – 10 ГГц становятся заметно ниже, чем в известных материалах с низким уровнем затухания;
- Полученное максимальное экспериментальное значение  $Q \times f \approx 10 \cdot 10^{13}$  Гц на частоте 9,5 ГГц соответствует лучшим достигнутым в мировой практике результатам и позволяет охарактеризовать синтетический алмаз как перспективный материал для СВЧ акустоэлектронных устройств.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Золотова, О. П. Упругие волны в пьезоэлектрических слоистых структурах / О. П. Золотова, С. И. Бурков, Б. П. Сорокин Б.П., **А. В. Теличко** // Журн. СФУ. Сер. Мат. и физ. – 2012. – Т. 5, № 2 – С. 164-186.
2. Гордеев, Г. И. Упругие свойства монокристалла синтетического алмаза / Г. И. Гордеев, Г. М. Квашнин, М. С. Кузнецов, Б. П. Сорокин, **А. В. Теличко** // Изв. ВУЗ'ов, серия Хим. хим. техн. – 2013. – Т. 56, № 7. – С. 50-52.
3. Сорокин, Б. П. Экспериментальное исследование линейных и нелинейных упругих свойств синтетического монокристалла алмаза / Б. П. Сорокин, Г. М. Квашнин, М. С. Кузнецов, **А. В. Теличко**, С. И. Бурков // Журн. СФУ. Сер. Мат. и физ. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 120-126.
4. Бормашов, В. С. Технология изготовления СВЧ пьезоэлектрических преобразователей на основе пленки AlN, нанесенной на подложку из синтетически монокристалла алма-

за / В. С. Бормашов, А. П. Волков, А. В. Голованов, Г. И. Гордеев, Г. М. Квашнин, Б. П. Сорокин, **А. В. Теличко** // Изв. ВУЗ'ов, серия Хим. хим. техн. – 2014. – Т. 57, № 5. – С. 17-21.

5. Сорокин, Б. П. Исследования многочастотных СВЧ акустических резонаторов на основе слоистой пьезоэлектрической структуры «Me1/AlN/Me2/(100) алмаз» / Б. П. Сорокин, Г. М. Квашнин, **А. В. Теличко**, Г. И. Гордеев, С. И. Бурков, В. Д. Бланк // Акуст. журн. – 2015. – Т. 61, № 3. – С. 464-476.

6. Сорокин, Б.П. Исследования СВЧ акустического затухания в многочастотном резонаторе на объемных акустических волнах на основе синтетического монокристалла алмаза / Б. П. Сорокин, **А. В. Теличко**, Г. М. Квашнин, В. С. Бормашов, В. Д. Бланк // Акуст. журн. – 2015. – Т. 61, № 5. – С. 1-13.

#### Публикации в журналах, индексируемых в поисковой платформе Web of Science

1. Sorokin, B. P. Temperature coefficients of elastic constants of trigonal, hexagonal, and tetragonal crystals / B. P. Sorokin B.P., **A. V. Telichko** // IEEE Trans. on Ultrason, Ferroel. and Freq. Contr. – 2012. – V. 59, N 2. – P. 311-314.

2. Sorokin, B. P. AlN/single crystalline diamond piezoelectric structure as a High overtone Bulk Acoustic Resonator / B. P. Sorokin, G. M. Kvashnin, A. P. Volkov, V. S. Bormashov, V. V. Aksenkov, M. S. Kuznetsov, G. I. Gordeev, **A. V. Telichko** // Appl. Phys. Lett. – 2013. – V. 102, N 11. – P. 113507.

3. **Telichko, A. V.** Extended temperature dependence of elastic constants in cubic crystals / A. V. Telichko, B. P. Sorokin // Ultrasonics – 2015. – V. 64. – P. 1-5.

#### Список публикаций в трудах конференций

1. Sorokin, B. P. Temperature coefficients of elastic constants of trigonal, hexagonal and tetragonal crystals / B. P. Sorokin, **A. V. Telichko** // Proc. of The IEEE Int. Joint Confer. of the Frequency Control and the European Frequency and Time Forum, San-Francisco, USA, 2-5 May 2011 / San-Francisco, 2011. – P. 468-471.

2. Сорокин, Б. П. Упругие свойства монокристалла синтетического алмаза / Б. П. Сорокин, Г. М. Квашнин, **А. В. Теличко**, М. С. Кузнецов, Г. И. Гордеев // Сб. трудов Конф. «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия российского акустического общества», Таганрог, Россия, 17-20 сентября 2012 / Таганрог, 2012. – С. 306-310.

3. Sorokin, B. P. Influence of the temperature and uniaxial pressure on the elastic properties of synthetic diamond single crystal / B. P. Sorokin, G. M. Kvashnin, M. S. Kuznetsov, **A. V. Telichko**, S. I. Burkov // Proc. of The 2012 IEEE Int. Ultrasonics Symp., Dresden, Germany, 7-10 October 2012 / Dresden, 2012. – P. 763-766.

4. Sorokin, B. P. Microwave acoustic properties of diamond single crystal as a substrate for High-overtone Bulk Acoustic Resonator / B. P. Sorokin, G. M. Kvashnin, A. P. Volkov, V. S.

Bormashov, V. V. Aksenkov, M. S. Kuznetsov, **A. V. Telichko**, G. I. Gordeev // Proc. of The 2013 Joint Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, European Frequency and Time Forum and Piezoelectric Force Microscopy workshop Symp., Prague, Czech Republic, 21-25 July 2013 / Prague, 2013. – P. 1684-1687.

5. **Telichko, A.V.** UHF acoustic attenuation and quality parameter limits in the diamond based HBAR / A. V. Telichko, B. P. Sorokin // Proc. of The IEEE Int. Frequency Control Symp. and European Frequency and Time Forum, Denver, USA, 12-16 April 2015 / Denver, 2015. – P. 94-99.

6. Kvashnin, G. M. Resonant transformation of acoustic waves observed for the diamond based HBAR / G. M. Kvashnin, **A. V. Telichko**, B.P. Sorokin // Proc. of The IEEE Int. Frequency Control Symp. and European Frequency and Time Forum, Denver, USA, 12-16 April 2015 / Denver, 2015. – P. 396-401.

### Использованная литература

[1] Zhang, H. High-tone Bulk Acoustic Resonators on sapphire, crystal quartz, fused silica, and silicon substrates / H. Zhang, W. Pang, H. Yu, E.S. Kim // J. Appl. Phys. – 2006. – V. 99. – P. 124911.

[2] Zhou, C. Extracting the electromechanical coupling constant of piezoelectric thin film by the high-tone bulk acoustic resonator technique/ C. Zhou, W. Pang, Q. Li, H. Yu, X. Hu, H. Zhang // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control – 2012. – V. 59, N 5. – P. 958-962.

[3] Tabrizian, R. Effect of phonon interactions on limiting the  $fQ$  product of micromechanical resonators / R. Tabrizian, M. Rais-Zadeh, F. Ayazi // Transducers, Denver, USA, June 21-25, 2009 / Denver, 2009. – P. 2131-2134.

[4] Cho, Y. Nonlinear, elastic, piezoelectric, electrostrictive, and dielectric constants of lithium niobate / Y. Cho, K. Yamanouchi // J. Appl. Phys. – 1987. – V. 61, N 3. – P. 875-887.

[5] Smith, R. T. Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalite and lithium niobate / R. T. Smith, F. S. Welsh // J. Appl. Phys. – 1971. - V. 42, N 6. – P. 2219-2231.

[6] Смагин, А. Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А. Г. Смагин, М. И. Ярославский – М.: Энергия, 1970. - 488 с.

[7] Смагин, А. Г. Упругие постоянные монокристалла  $\alpha$ -кварца / А. Г. Смагин, Б. Г. Мильштейн // Кристаллогр. – 1974. – Т. 19. – С. 832-836.

[8] Shrivastava, U. C. Theory of the anomalous temperature dependence of  $C_{12}$  in NaCl-like solids // Phys. Stat. Sol. B. – 1980. – V. 100, N 2. – P. 641-649.

[9] Slagle, O. D. Temperature dependence of the elastic constants of the alkali halides. I. NaCl, KCl, and KBr / O. D. Slagle, H. A. McKinstry // J. Appl. Phys. – 1967. – V. 38, N 2. – P. 437-446.

- [10] Mohazzani, P. Temperature dependence of the elastic constants of copper, gold and silver // J. Phys. Chem. Solids. – 1985. – V. 46, N 1. – P. 147-150.
- [11] McSkimin, H. J. The elastic stiffness moduli of diamond / H. J. McSkimin, P. Andreatch, Jr., P. Glynn // J. Appl. Phys. – 1971. – V. 43, N 3. – P. 985-987.
- [12] Cousins, C. S. G. Elasticity of carbon allotropes. I. Optimization, and subsequent modification, of an anharmonic Keating model for cubic diamond // Phys. Rev. B. – 2003. – V. 67. – P. 024107.
- [13] Lang, J. M., Jr. Experimental determination of third-order elastic constants of diamond / J. M. Lang, Jr., Y. M. Gupta // Phys. Rev. Letters. – 2011. – V. 106. – P. 125502.