

ОТЗЫВ

официального оппонента Анисимкина Владимира Ивановича на диссертационную работу Дорофеевой Светланы Сергеевны «Исследование акустических волн в пьезоэлектрических материалах для создания термостабильных и термостойких акустоэлектронных устройств», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Автореферат диссертации Дорофеевой Светланы Сергеевны представляет собой фундаментальное исследование, посвященное изучению акустических волн в пьезоэлектрических материалах с целью создания термостабильных и термостойких акустоэлектронных устройств. Работа выполнена в ООО «БУТИС» под руководством доктора технических наук Сеницыной Татьяны Викторовны.

Исследование охватывает широкий спектр актуальных задач, связанных с повышением температурной стабильности устройств на поверхностных и приповерхностных акустических волнах (ПАВ и ППАВ). Проблематика, затронутая в диссертации, имеет большое практическое значение для радиоэлектроники, в частности для систем связи, управления и обработки сигналов.

Актуальность темы диссертации

Актуальность темы исследования обусловлена быстрым развитием современных систем связи и информационных технологий, требующих высокоточных и надежных компонентов. Акустоэлектронные устройства на ПАВ широко используются в различных радиочастотных приложениях, включая мобильную связь, радиолокационные системы и устройства обработки сигналов.

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество работы таких устройств, является температурная стабильность. Применение материалов с улучшенными характеристиками позволяет существенно повысить эффективность работы оборудования в условиях изменяющихся температур. Исследование Дорофеевой направлено на решение этой актуальной задачи, что подтверждает его значимость для современной науки и техники.

Обоснованность и достоверность результатов

Научные положения и выводы, представленные в работе, обладают высокой степенью обоснованности. Автор использовала современные методы численного моделирования и экспериментальные исследования, что позволило получить

достоверные результаты. Применение комплексного подхода к исследованию свойств пьезоэлектрических материалов и анализу акустических волн свидетельствует о глубокой проработке темы.

Результаты исследований согласуются с данными, представленными в научной литературе, а также дополняют их новыми сведениями. Диссертация содержит убедительное обоснование достоверности каждого вывода, что подтверждается сопоставлением теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна диссертационного исследования заключается в выявлении новых закономерностей распространения акустических волн в различных пьезоэлектрических материалах. Особое внимание уделено выбору материалов и конструктивных решений, обеспечивающих повышенную термостабильность устройств.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для проектирования и производства акустоэлектронных устройств нового поколения. Разработанные методики и рекомендации могут быть применены в оборонной, авиационной и космической отраслях, а также в гражданской радиосвязи.

Основные результаты

Основными результатами диссертационной работы являются:

- Разработка методов оценки температурной стабильности пьезоэлектрических материалов.
- Определение оптимальных параметров материалов и конструкций для достижения высокой термостабильности.
- Предложение рекомендаций по выбору материалов для устройств на ПАВ и ППАВ.
- Экспериментальная верификация полученных теоретических результатов.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в 35 научных трудах, в том числе в 10 статьях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 патентах, 4 Свидетельствах ФИПС о государственной регистрации интегральных топологий, полученные на предложенные оригинальные конструктивные решения. А также представлены на российских и международных конференциях, где результаты работы получили

положительные отзывы от специалистов в области акустоэлектроники, что подтвердило актуальность выбранной темы и новизну предложенных решений.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 93 наименования. Основная часть работы изложена на 184 страницах, содержит 156 рисунков и 15 таблиц.

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, а также определение методов и подходов, применяемых в работе.

Первая глава посвящена исследованию свойств STW волн в срезах кварца ($YXls/\psi/90^\circ$) и созданию на их основе высокочастотных пьезоэлектрических фильтров. Обнаружена анизотропия свойств волн, таких как скорость распространения, коэффициент электромеханической связи и коэффициент отражения, которые зависят от угла ψ и толщины алюминиевой плёнки. Также выявлен эффект естественной однонаправленности волн. Срез кварца $YXls/38^\circ/90^\circ$ продемонстрировал максимальную разность фаз между эффективными центрами отражения и преобразования волны в 25° . Моделирование характеристик устройств с использованием модели Р-матриц и программы SAW_PM показало высокую точность и оптимальные условия для минимизации температурных частотных уходов. Для обеспечения термостабильности рекомендовано использовать срез кварца $YXls/36^\circ/90^\circ$ и алюминиевые плёнки толщиной 1,95%–2,23%.

Вторая глава посвящена исследованию катангасита для применения в технике ПАВ. Оптимальными ориентациями для использования в устройствах являются $(0^\circ, 90^\circ, \psi)$, где угол ψ варьируется от 0° до 40° , что обеспечивает наилучшие результаты по коэффициенту электромеханической связи, добротности резонаторов и температурной стабильности. Сравнение экспериментальных данных с моделированием позволило точно определить зависимость электрофизических параметров от угла ψ , а исследования температурной стабильности показали изменчивость характеристик ТКЧ в широком температурном диапазоне от -60°C до $+120^\circ\text{C}$. Катангасит показал свою эффективность в высокотемпературных сенсорах, сохраняя пьезоэлектрические свойства при температурах до 1000°C . Разработанная конструкция сенсора с монокристаллическим корпусом и иридиевой металлизацией обеспечила стабильную работу датчиков давления в экстремальных условиях. Эти результаты подтверждают катангасит как оптимальный материал для ПАВ устройств, работающих в сложных условиях.

положительные отзывы от специалистов в области акустоэлектроники, что подтвердило актуальность выбранной темы и новизну предложенных решений.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 93 наименования. Основная часть работы изложена на 184 страницах, содержит 156 рисунков и 15 таблиц.

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, а также определение методов и подходов, применяемых в работе.

Первая глава посвящена исследованию свойств STW волн в срезах кварца ($YXls/\psi/90^\circ$) и созданию на их основе высокочастотных пьезоэлектрических фильтров. Обнаружена анизотропия свойств волн, таких как скорость распространения, коэффициент электромеханической связи и коэффициент отражения, которые зависят от угла ψ и толщины алюминиевой плёнки. Также выявлен эффект естественной однонаправленности волн. Срез кварца $YXls/38^\circ/90^\circ$ продемонстрировал максимальную разность фаз между эффективными центрами отражения и преобразования волны в 25° . Моделирование характеристик устройств с использованием модели Р-матриц и программы SAW_PM показало высокую точность и оптимальные условия для минимизации температурных частотных уходов. Для обеспечения термостабильности рекомендовано использовать срез кварца $YXls/36^\circ/90^\circ$ и алюминиевые плёнки толщиной 1,95%–2,23%.

Вторая глава посвящена исследованию катангасита для применения в технике ПАВ. Оптимальными ориентациями для использования в устройствах являются $(0^\circ, 90^\circ, \psi)$, где угол ψ варьируется от 0° до 40° , что обеспечивает наилучшие результаты по коэффициенту электромеханической связи, добротности резонаторов и температурной стабильности. Сравнение экспериментальных данных с моделированием позволило точно определить зависимость электрофизических параметров от угла ψ , а исследования температурной стабильности показали изменчивость характеристик ТКЧ в широком температурном диапазоне от -60°C до $+120^\circ\text{C}$. Катангасит показал свою эффективность в высокотемпературных сенсорах, сохраняя пьезоэлектрические свойства при температурах до 1000°C . Разработанная конструкция сенсора с монокристаллическим корпусом и иридиевой металлизацией обеспечила стабильную работу датчиков давления в экстремальных условиях. Эти результаты подтверждают катангасит как оптимальный материал для ПАВ устройств, работающих в сложных условиях.

Третья глава описывает исследования термостабильных ППВ фильтров на основе слоистых пластин LT/Si. Конструкции с пьезоэлектрическим слоем и кремниевой подложкой обеспечивают термокомпенсацию и улучшенную стабильность при изменении температуры. Исследования показали, что конструкции импедансного типа уменьшают паразитные моды в высокочастотной полосе, а использование слоистых пластин с толщинами пьезоэлектрического слоя от 3,5 до 9 длин волн улучшает термостабильность фильтров в 2-3 раза.

Результаты исследований были подтверждены внедрением фильтра для подавления помех в гражданской авиации, что обеспечило подавление спутниковых помех на частоте 1626 МГц.

Замечания и предложения

Несмотря на высокое качество выполненной работы, имеются некоторые замечания:

1. Ввиду отличия материальных констант монокристаллических и поликристаллических пленок Al точность определения оптимальной толщины пленок Al до сотых значений процента представляется завышенной.

2. Не отражены преимущества составных пластин по сравнению с традиционными структурами тонкая пленка на объемной подложке с противоположными температурными коэффициентами (например, пленка ZnO (-30 ppm/°C) на окисленном кремнии SiO₂(+85 ppm/°C)/Si (-21 ppm/°C) – S.Ono, K.Wasa, S.Hayakawa. Wave Electronics, 1977, vol.3, no.1, pp.35-49).

3. При перечислении результатов работы, сделанных в конце диссертации, следовало бы указывать не то, что сделано, а то, что получено в диссертации.

Однако описанные замечания не снижают общего положительного впечатления от работы. Содержание работы соответствует специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Заключение

Учитывая вышесказанное, считаю, что диссертационная работа Дорофеевой Светланы Сергеевны является завершенным научным исследованием, обладающим высокой научной новизной и практической значимостью.

Представленная диссертация «Исследование акустических волн в пьезоэлектрических материалах для создания термостабильных и термостойких

акустоэлектронных устройств» соответствует требованиям пункта п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», ВАК Минобрнауки РФ утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявленным к кандидатским диссертациям, а ее автор Дорофеева Светлана Сергеевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. — «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» (пункт №1,4,5 паспорта специальности).

Официальный оппонент

Анисимкин Владимир Иванович,

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

лаборатории акустоэлектронных процессов

в твердотельных структурах, Институт радиотехники

и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН)

Диссертация защищена по специальности:

01.04.10 «Физика полупроводников и диэлектриков»

Адрес: 125009, г.Москва, ул. Моховая, 11, стр.7

Тел: 8(495)629-72-83

e-mail: anis@cplire.ru

В.И. Анисимкин

« ____ » _____ 2025 г.

Подпись Анисимкина В.И. удостоверяю

Ученый секретарь ИРЭ РАН

Чусов И.И.



И.И. Чусов