

ОТЗЫВ

официального оппонента Жгуна Сергея Александровича 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

Актуальность диссертационного исследования

В настоящее время проблемы совершенствования отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) приобретают важнейшее значение в связи с увеличением объёма их производства, расширением областей применения, а также возросшей конкуренцией и проблемами поставки зарубежной ЭКБ.

Одним из наиболее распространённых и востребованных типов ЭКБ в различной аппаратуре обработки сигналов являются устройства частотной селекции и, в частности, фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ), позволяющие реализовать широкий диапазон полос пропускания от 0,05% до 85% на частотах до 3 ГГц. Частотно-избирательные параметры фильтров ПАВ в значительной степени определяют качество аппаратуры, используемой в различных системах связи, навигации, радиолокационной и телекоммуникационной аппаратуре и системах управления.

Решение задачи улучшения термостабильности ПАВ-устройств, которой посвящена диссертационная работа Дорофеевой С.С., позволяет существенно расширить области применения данной ЭКБ и увеличить эффективную полосу пропускания входных трактов РЭА. Предложенные в работе методы имеют высокую *практическую значимость* в связи с возможностью их применения как в современных системах радиолокации, связи и навигации, так и в промышленном производстве и других областях науки и техники, таких как разработка и производство авиационных двигателей, для контроля технологических процессов в научных экспериментах. Востребованность устройств на ПАВ подтверждает *актуальность и своевременность* представленных исследований. Решение проблемы температурной стабильности ПАВ компонентов имеет важное народно-хозяйственное значение, обеспечивая возможность сложной обработки радиочастотных сигналов и повышая надежность систем связи, радиолокационной и телекоммуникационной аппаратуры.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии цитируемой литературы. Материал диссертации хорошо структурирован по главам, приведенные в диссертации выводы и рекомендации, в основном, соответствуют результатам расчетов и экспериментов, полученным в процессе исследований.

Во введении в соответствии с требованиями ВАК сформулированы основные цели и задачи работы, обозначены методы исследований, указана научная новизна работы, основные положения, выносимые на защиту, а также, обоснована достоверность результатов, отражен личный вклад соискателя, указана апробация работы и подтверждено соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Глава 1 диссертационной работы посвящена исследованию свойств STW волн в $YXls/\psi/90^\circ$ срезах кварца, и высокочастотным пьезоэлектрическим фильтрам на их основе.

Выявлена анизотропия свойств STW волны в исследуемых срезах кварца. Также следует отметить естественную направленность излучения, характеризующуюся разницей фаз в исследуемых срезах кварца, которые подтверждаются дальнейшими исследованиями и экспериментами.

Кратко описаны математическая модель на основе теории связанных мод (COM - модель), используемая в дальнейшем при моделировании фильтров на STW. Разработанная модификация оригинальной программы SAW_PM позволила обеспечить точность моделирования характеристик высокочастотных фильтров на основе STW с учетом выявленных эффектов и уточненных параметров STW волны. Предложенный диапазон относительной толщины пленки алюминия 1,95%...2,23% и выбранный $YXls/36^\circ/90^\circ$ срез кварца обеспечивают минимальный ТКЧ STW устройства в диапазоне рабочих температур от минус 60°C до +85°C.

Исследование катангасита в **Главе 2** проведено детально и высококачественно на основе тщательного анализа публикаций и собственных теоретических и экспериментальных данных. Выводы имеют важную практическую направленность. Экспериментальные данные, полученные автором, представляют научный интерес и существенно уточняют ранее опубликованные результаты.

Тщательная проверка температурного поведения от частоты, проведенная для катангасита, позволила уточнить ориентацию, обеспечивающую нулевой линейный член ТКЧ с точкой перегиба при 40 °C, и измерить с необходимой для практических применений точностью коэффициент при квадратичном члене.

Публикаций по катангаситу пока мало, внимание исследователей в мире отвлечено на другие материалы для применения при умеренных температурах в то время, как беспроводные датчики, работающие при экстремальных температурах, например, лопаток турбореактивных двигателей, пока окончательно не разработаны, хотя и являются востребованными. Поэтому результаты диссертации в этом направлении представляют большой научный и практический интерес. Так как большинство современных публикаций опирается на численное моделирование, не подкрепленное экспериментальными подтверждениями, в этой работе особо приятно видеть результаты экспериментов виде измеренных и эмпирических зависимостей. Описанные в данной главе метод моделирования и программа расчета резонаторов позволяют проводить разработку изделий достаточно оперативно и с высокой степенью адекватности моделирования.

Очень приятно видеть доведенную до конца нетривиальную работу с корпусированием высокотемпературного датчика на катангасите и его испытаниями при высоком давлении и высокой температуре. Это выдающийся результат, пока не повторенный в мировых публикациях. Научный интерес представляют отработанные автором детали изготовления корпусов датчика давления, а вид готового датчика с прозрачным основанием вызывает

заслуженное уважение. Это – действительно, доделанная до конца напряженная работа по поиску новых и ранее не использовавшихся подходов.

Очень удачный выбор ориентации позволил разместить диапазон изменения частот датчика при изменении температуры в окрестности достаточно узкого диапазона частот вблизи 433 МГц. Детальность испытаний датчика может служить хорошим примером достоверной и тщательной работы экспериментатора и полноценного выполнения поставленных задач.

В **Главе 3** описываются исследования термокомпенсированных фильтров на приповерхностных акустических волнах ППАВ на основе слоистых пластин танталата лития на кремнии. Проведен сравнительный анализ большого массива экспериментальных данных о влиянии различных типов конструкций пьезоэлектрических фильтров на ППАВ (импедансный, кольцевой, с продольной акустической связью и гибридный), реализованных на основе слоистых пластин, на рабочие характеристики фильтров. На основе полученных результатов сделан вывод, что конструкция импедансного типа позволяет снизить уровень паразитных мод за полосой пропускания до уровня порядка -40 дБ. Также по результатам проведенных в диссертационной работе исследований определено влияние толщины слоев танталата лития и кремния на амплитудно-частотные и температурно-частотные характеристики фильтров. Показано, что применение слоистых пластин, состоящих из несущей кремниевой подложки толщиной 230 или 400 мкм и расположенного на ней пьезоэлектрического слоя танталата лития $Y\text{Xl}/42^\circ$ -среза толщиной не более 6 или 9 длин волн, соответственно, позволяет улучшить температурный коэффициент частоты ППАВ фильтра более чем в 2 раза.

Мне нравится, что эмпирический подход использован для сравнительного выяснения возможностей использования подложек с разными толщинами для фильтров с различными спецификациями, что особенно важно для серийного производства. С моей точки зрения, результаты исследований термокомпенсированных слоистых пластин танталата лития на кремнии представляют большой интерес для развития современной акустоэлектроники, поскольку позволяют обеспечить кратно уменьшенный температурный коэффициент частоты при сохранении высокой избирательности и линейности фильтров на частотах СВЧ диапазона.

Особо интересно, что в качестве слоистых подложек в данной диссертации выбраны термокомпенсированные подложки, отличающиеся относительно большими толщинами пьезоэлектриков (3,5-9 длин волн) и несущей кремниевой подложки (400 мкм) в то время, как большое количество современных публикаций сфокусировалось на толщинах пьезоэлектриков в 20-50 раз тоньше. Выбранная автором область толщин позволяет получать достаточно низкое (но не предельно низкое) затухание волн и не обеспечивает предельно широкую полосу пропускания, однако, только она обеспечивает достаточно высокую мощность сигнала, в несколько раз превышающую допустимую мощность в концентрирующих энергию тонких волноводных пленках, при достаточной для важных применений полосе пропускания. Но важнейшее преимущество данного выбора в том, что на такой подложке можно изготавливать устройства, рассчитанные для работы в разных участках

очень широкого диапазона. Действительно, в этой области число публикаций осталось ограниченным, вал публикаций наблюдается в отношении получения экстремально высоких параметров на одной частоте, при этом незаполненная, но очень важна ниша, связанная с многодиапазонными устройствами, осталась без необходимого внимания. Выбор автора – безусловно обоснован и востребован, особенно в условиях РФ. Надежная, высококачественная работа по детальному сравнению обычных и слоистых подложек в малоизученном диапазоне толщин пьезоэлектрика.

В работе предложено нестандартное конструктивное решение по пространственному разнесению резонаторов по разным акустическим каналам в топологии импедансного типа, позволяющее значительно уменьшить неравномерность АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания. Это позволило реализовать ряд термокомпенсированных ППАВ фильтров на частоты 700-1587 МГц с избирательностью более 40 дБ и температурным коэффициентом частоты $(-12 \dots -15,8) \cdot 10^{-6}$ ед./град. в зависимости от рабочего диапазона частот.

Отмечу обоснованное успешное применение АФМ для измерения профиля электродов ВШП и ОР, позволяющего учитывать реальные результаты технологии для повышения точности проектирования ПАВ устройств.

К несомненным достоинствам диссертации следует отнести методичность изложения и заботу о подробностях, необходимых читателям для воспроизведения результатов экспериментов, а также глубину проведенных исследований, практическую направленность полученных результатов и большой объем экспериментов, подтверждающих основные выводы.

На мой взгляд, диссертация Дорофеевой С.С. содержит ряд **новых научных результатов**, имеющих и высокую практическую ценность. К ним относятся следующие:

1. Показано, что в отличие от ПАВ, распространяющихся в YXl/ψ срезах кварца, распространение STW волн в $YXls/\psi/90^\circ$ срезах кварца имеет выраженную направленность излучения в направлении $+90^\circ$. При этом $YXls/38^\circ/90^\circ$ срез кварца имеет максимальную разность фаз между эффективными центрами отражения и преобразования волны, равную 25° .

2. Экспериментально доказано, что для обеспечения минимального ТКЧ STW устройства, соизмеримого с ТКЧ ПАВ фильтров на основе YXl/ψ срезов кварца, в диапазоне рабочих температур от минус 60°C до $+85^\circ\text{C}$, необходимо использовать $YXls/36^\circ/90^\circ$ срез кварца и пленки Al с относительной толщиной из диапазона 1,95%...2,23%.

3. Экспериментальным путем получены зависимости основных электрофизических параметров ПАВ (коэффициент электромеханической связи, эффективная скорость волны, отражения и ТКЧ), используемые при моделировании устройств на ПАВ, как функции угла ψ для катангасита ориентаций $(0^\circ, 90^\circ, \psi)$, где $\psi=0^\circ \dots 40^\circ$.

4. Предложено оригинальное конструктивное решение сенсора на ПАВ на основе монокристаллического корпуса из катангасита ориентации $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$, в котором основание является мембраной, и пленки иридия для формирования электродных структур резонаторов

обеспечивают работоспособность устройства в диапазоне рабочих температур от минус 60°C до +500°C и в диапазоне изменения давления до 50 атм.

5. На основании результатов исследований установлено, что для реализации высокоизбирательных термокомпенсированных ППАВ фильтров на основе слоистых пластин с толщинами пьезоэлектрика, изученными в диссертации, в отличие от некоторых других распространенных типов подложек, необходимо использовать многозвенные конструкции импедансного типа, в которых резонаторы расположены в разных акустических каналах, что позволяет минимизировать влияние паразитных мод разной физической природы, существующих при таких толщинах пьезоэлектриков, и обеспечивает избирательность не менее 40 дБ.

6. Показано, что применение слоистых пластин LT/Si , состоящих из несущей кремниевой подложки толщиной 230 или 400 мкм и расположенного на ней пьезоэлектрического слоя танталата лития $YXl/42^\circ$ -среза толщиной не более 6 или 9 длин волн, соответственно, позволяет улучшить температурный коэффициент частоты ППАВ фильтра более чем в 2 раза.

Достоверность разработанных моделей и методов моделирования подтверждается высокой степенью совпадения расчетных и экспериментальных характеристик. Основные результаты диссертации опубликованы как в периодических научных журналах, так и в отдельных сборниках, докладывались на различных конференциях, что также подтверждает их достоверность и актуальность.

Практическая значимость диссертации подтверждена внедрением ее результатов на предприятии ООО «БУТИС». Москва, с достижением экономического эффекта более 10 млн. рублей за период 2018 – 2025 гг.

Вместе с тем диссертация Дорофеевой С. С. не лишена **недостатков**. К ним следует отнести:

1. Обозначение «А» на приведенных характеристиках резонаторов 2.18-2.20, 2.29-2.32, 2.48 не расшифровывается по тексту работы.

2. Нет объяснений физической природы возникновения побочных пиков на характеристике ПАВ резонатора на основе катангасита ориентации (0° , 90° , 0°), рисунки 2.29, 2.30, 2.31.

3. Непривычная и не легко воспринимаемая, или трудно запоминаемая аббревиатура «ППАВ» несмотря на то, что она достаточно ясно расшифрована перед первым употреблением.

4. Недостаточное внимание уделено анализу слоистых подложек со слоем пьезоэлектрика толщиной вблизи 15% от длины волны и пояснению их слабых сторон, в сравнении с выбранными толщинами, что требует от читателя изначально глубокого знания свойств этих структур.

5. В тексте диссертации имеются редкие опечатки, например: «...специализированного измерительного устройства, показанного на рис.1.7, представляющего собой линию задержки с расстоянием между преобразователями $L=0,3$ м. ...» (стр. 24) вместо 0.03 м, и неудачное форматирование рисунка 1.11 и подписи к рисунку 1.14.

6. Конечно, заметно, что по объективным причинам, не хватает современного моделирования полноразмерных структур в импортных, запрещенных для лицензирования в РФ коммерческих средах типа Comsol Multiphysics® и других. Однако автор успешно использует отечественные подходы и наработки компании Бутис-М, которые в большинстве случаев обеспечивают полноценное импортозамещение этих продуктов.

Высказанные замечания, безусловно, не влияют на положительную оценку диссертационной работы С.С. Дорофеевой, которая является логически завершенным теоретическим и экспериментальным исследованием проблемы, обладающей актуальностью, новизной, а также большой научной и практической значимостью. Представленные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в современных системах приема, передачи и обработки информации, работающих в диапазоне частот до 2,5 ГГц.

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 нанoeлектроники, квантовых устройств» (пункт №1,4,5 паспорта специальности).

Официальный оппонент

Жгун Сергей Александрович,

кандидат технических наук по специальности

05.12.01 «Теоретические основы радиотехники»,

старший научный сотрудник,

заведующий научной лабораторией кафедры основ

радиотехники Института радиотехники и электроники

им. В.А. Котельникова, ФГБОУ ВО «Национальный

исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Тел. +7 (495) 362 70 14, e-mail: zhgoon@mpei.ru

Подпись Жгуна С.А. удостоверяю

e-mail: universe@mpei.ac.ru, www.mpei.ru



С.А. Жгун

06 октября 2025 г.

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник отдела управления

по работе с персоналом



А. ЯРЕМЕНКО