

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 219.001.04 НА БАЗЕ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ», ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 21 сентября 2017 г. № 20

О присуждении Швецову Александру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры» по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения принята к защите 18.05.2017, протокол № 17, диссертационным советом Д 219.001.04, созданным на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ), Федеральное агентство связи, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, приказ о создании совета – № 244/нк от 03.03.2016.

Соискатель Швецов Александр Сергеевич, 1979 года рождения, в 2011 году окончил магистратуру федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)» с присуждением степени магистра техники и технологии по направлению «Радиотехника». Работает в должности научного сотрудника в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»).

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель - Жгун Сергей Александрович, кандидат технических наук, с.н.с., заведующий НИЛ Волновых процессов и статистической радиофизики НИУ «МЭИ».

Официальные оппоненты:

1. Орлов Виктор Семенович - доктор технических наук, с.н.с., главный научный сотрудник НИЛ-3303 «Акустоэлектронные устройства» научно-исследовательской части ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ),

2. Сеницына Татьяна Викторовна - кандидат технических наук, главный конструктор, начальник конструкторско-технологического отдела общества с ограниченной ответственностью «БУТИС»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Элпа» с опытным производством» (АО «НИИ «Элпа»), г. Москва, в своем положительном заключении (отзыве), рассмотренном и одобренном на заседании Научно-технического совета АО «НИИ «Элпа», подписанном ведущим научным сотрудником НПК-1 АО «НИИ «Элпа», д.ф.-м.н. Анисимкиным В.И., ведущим научным сотрудником НПК-1 АО «НИИ «Элпа», к.ф.-м.н. Валянским К.И., заместителем директора НПК-1 по научной работе АО «НИИ «Элпа», к.т.н. Голубским А.А. и директором НПК-1 АО «НИИ «Элпа» Галановым Г.Н, утвержденном 1-м заместителем генерального директора АО «НИИ «Элпа» Локтевым В.А., указала, что диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, ее содержание соответствует пунктам 9 и 10 паспорта специальности 05.12.04. В работе впервые проведен анализ зависимости энергии переизлученного датчиком сигнала от параметров резонатора на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и подключенного к нему радиотехнического тракта; впервые проведен анализ результатов расчета параметров всех видов невытекающих ПАВ для возможных ориентаций подложек кварца, лангасита, танталата и ниобата лития применительно к их использованию в качестве подложек для ПАВ резонатора, являющегося чувствительным элементом

беспроводного датчика температуры. В экспериментальном плане новизна данной диссертационной работы отражается в первом опубликованном совместном использовании для чувствительного элемента датчика двух различных типов волн: волны Рэлея и волны Гуляева-Блюштейна, позволившим получить на одной подложке разницу температурных коэффициентов частоты (ТКЧ), превышающую 130 миллионных долей на градус Цельсия, что значительно выше, чем у ранее предлагавшихся пар резонаторов на ПАВ. В диссертации показано, что при использовании импульсного режима опроса датчиков для достижения максимальной эффективности общепринятое условие согласования должно быть модифицировано с учетом параметров конкретных резонаторов на подложках с конкретными ориентациями, и даны конкретные рекомендации по подбору параметров резонаторов. На основе анализа результатов расчета параметров ПАВ определены максимально достижимые значения разницы ТКЧ в зависимости от требуемого значения коэффициента электромеханической связи (КЭМС) для четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических материалов. В работе найдены ориентации подложек из пьезоэлектрических кристаллов, позволяющие получать небольшие разницы ТКЧ для измерений в широком диапазоне температур, и ранее неизвестные ориентации для высокочувствительных измерений в ограниченном диапазоне температур. Их внедрение в разработках АО «НПП «Радар ММС» и ОАО «Фомос-Материалс» является важным практическим результатом и имеет значимость для производства.

Соискатель имеет 19 опубликованных работ по теме диссертации, из них 13 работ - в изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки РФ. Наиболее значимые публикации в изданиях перечня ВАК:

- 1) Shvetsov, A. Quartz orientations for optimal power efficiency in wireless SAW temperature sensors / A.Shvetsov, S.Zhgoon, I.Antcev, S.Bogoslovsky, G.Sapozhnikov // 2016 European Frequency and Time Forum. - 2016. - С.1.
- 2) Shvetsov, A. Choice of quartz cut for sensitive wireless SAW temperature sensor / A.Shvetsov, S.Zhgoon, I.Antsev, S.Bogoslovsky, G.Sapozhnikov, K.Trokhimets, M.Derkach // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. - 2014. - С.1505.

- 3) Патент РФ № 2537751. Чувствительный элемент на поверхностных акустических волнах для измерения температуры / авторы Анцев И.Г., Богословский С.В., Сапожников Г.А., Швецов А.С., Жгун С.А. - Заявка №2013111112/28, приоритет от 12.03.2013, опубл. 10.01.2015 в Бюлл. №1.
- 4) Zhgoon, S. SAW temperature sensor on quartz / S.Zhgoon, A.Shvetsov, I.Ancev, S.Bogoslovsky, G.Sapozhnikov, K.Trokhimets, M.Derkach // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. - 2015. - N 6. - C.1066.
- 5) Antcev, I. Comparative analysis of the experience obtained from the use of SAW and BAW wireless resonator temperature sensors for surgery / I.Antcev, S.Bogoslovsky, G.Sapozhnikov, S.Zhgoon, A.Shvetsov // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium. - 2015. - C.1.
- 6) Morgan, D.P. One-port SAW resonators using natural SPUDT substrates / D.P.Morgan, S.Zhgoon, A.Shvetsov // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. - 2007. - N 10. - C.1936.
- 7) Zhgoon, S. Single port SAW resonators design for arbitrary reflection phase / S.Zhgoon, A.Shvetsov, O.Shteynberg, D.P.Morgan, P.G.Ivanov // 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. - 2006. - C.1883.

Доля авторского участия соискателя составляет 75 % в первой из вышеупомянутых работ, 50 % – во второй, 25 % - в остальных перечисленных работах. В них содержатся все основные результаты диссертации.

На диссертацию поступили отзывы:

1. От официального оппонента Орлова Виктора Семеновича, доктора технических наук, с.н.с., главного научного сотрудника НИЛ-3303 «Акустоэлектронные устройства» НИЧ МТУСИ. Отзыв положительный и содержит следующие замечания: 1) отсутствие в тексте диссертации подробного описания разработанных в диссертации конструкций резонаторов на ПАВ; 2) исследование вопросов согласования резонаторов с радиотехническим трактом ограничено рассмотрением радиотехнического тракта с чисто активным сопротивлением; 3) не рассматриваются вопросы искажений амплитудно-частотных характеристик резонаторов за счет поперечных мод поверхностных акустических волн; 4) в модели

резонатора на ПАВ не учитывается излучение встречно-штыревым преобразователем объемных акустических волн.

2. От официального оппонента Сеницыной Татьяны Викторовны, кандидата технических наук, главного конструктора, начальника конструкторско-технологического отдела ООО «БУТИС». Отзыв положительный и содержит следующие замечания: 1) сформулированная цель работы не в полной мере отражает название и суть диссертации – нет привязки к использованию в составе беспроводных пассивных датчиков температуры; 2) при расчете проводимости ПАВ-резонатора не уделено внимания анализу паразитных элементов конструкции (емкости подводных шин, контактных площадок, выводов корпуса, индуктивности проволочных перемычек и т.д.), что снижает точность и достоверность полученных расчетных характеристик; 3) вызывает сомнение практическая реализуемость рекомендованных ориентаций пьезоэлектрических подложек танталата лития и ниобата лития с ненулевым углом ϕ , поскольку при такой ориентации требуется на порядок более высокая точность изготовления подложек с целью обеспечения повторяемости электрофизических параметров; 4) отсутствует экспериментальное подтверждение по рекомендованным для реализации ПАВ-резонаторов срезам танталата лития и ниобата лития.

3. От ведущей организации – АО «НИИ «Элпа». Отзыв положительный и содержит следующие замечания: 1) в тексте диссертации очень кратко описаны результаты, относящиеся к резонаторам на подложках для датчиков высоких температур, представляющие большой практический интерес; 2) при исследовании согласования резонаторов с радиотехническим трактом не рассмотрено влияние согласующих элементов; 3) в работе не нашли отражения вопросы, относящиеся к свойствам систем измерения температуры, основанных на датчиках с ПАВ резонаторами; 4) подробная экспериментальная проверка ТКЧ резонаторов проведена только для предложенных в диссертации ориентаций подложек из кварца, менее подробная проверка проведена для подложек из лангасита, отсутствуют экспериментальные данные для подложек из ниобата и танталата лития; 5) работа чрезмерно сосредоточена на резонаторах с максимальными значениями ТКЧ, подходящих для измерения температуры в узком диапазоне; резонаторы с меньшим

ТКЧ для измерения температуры в более широком диапазоне рассмотрены недостаточно подробно; 6) в тексте диссертации вместо термина «нормальные условия» используется не вполне корректное в данном контексте выражение «комнатная температура»; 7) в работе используется термин «волна Гуляева-Блюштейна» как применительно к волнам, распространяющимся вдоль свободной поверхности, так и применительно к волнам, распространяющимся в элементах резонатора; использование этого термина выглядит спорным применительно к физическому резонатору на ПАВ.

На автореферат поступило 14 отзывов: ОАО "Фомос-Материалс", ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Transense Technologies plc., ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (МИРЭА), ФГБУН «Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук», ООО «АЭК Дизайн», ООО «АУРУМ», ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Химический факультет ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Саратовский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», АО «Научно-исследовательский институт «Рубин», ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук». Все поступившие отзывы положительные.

Замечания, содержащиеся в отзывах на диссертацию и автореферат, представлены в следующем обобщенном виде: 1) отсутствие в автореферате конструктивных особенностей изготовленных резонаторов для высокотемпературных датчиков на ПАВ, связанные с используемым материалом электродов и технологией изготовления резонаторов; 2) в автореферате не содержится сведений о конструкции рассматриваемых датчиков температуры (габариты, топология резонаторов, сочетание двух звукопроводов, выполненных из разных срезов кварца, и др.); 3) не сообщается об оценке чувствительности предложенных резонаторов к физическим воздействиям, отличным от

температурных (ускорение, давление, угловая скорость); 4) в тексте автореферата присутствует незначительное количество опечаток; 5) недостаточное внимание уделено альтернативным вариантам создания пассивных беспроводных датчиков на основе линий задержки; в частности не определены преимущества резонаторной технологии по сравнению с технологией линий задержки; 6) представляется спорным утверждение о меньших габаритах датчика с резонаторами по сравнению с датчиком на основе линий задержки, поскольку габариты определяются антенной, а не чувствительным элементом; 7) диссертация соискателя несомненно бы выиграла от экспериментального подтверждения полученных теоретических кривых зависимости эффективности переизлучения резонансного датчика от сопротивления радиотракта; 8) отсутствие определения коэффициента связи в автореферате; 9) в автореферате не приведены схемы, описывающие конструкцию предложенных автором чувствительных элементов, что не позволяет в полной мере оценить пункт 3 формулировки научной новизны работы; 10) в описании четвертой главы приведены экспериментальные данные, но не описаны методики измерений, в результате которых они получены; 11) не обоснован выбор аппроксимирующих линий на рисунке 4; 12) отсутствует сравнение датчиков на ПАВ с беспроводными пассивными датчиками других типов; 13) при решении задачи о получении максимальной энергии отклика датчика не учтено влияние фактического времени приема отклика; 14) не представлены экспериментальные частотные характеристики резонаторов, например S11; 15) не приведены параметры конструкций выбранных резонаторов – число периодов преобразователя, типы отражательных решеток, апертуры, наличие аподизации в преобразователе; 16) отсутствие сравнения возможностей датчиков на традиционных резонаторах с датчиками на основе MEMS, которые активно развиваются последнее время, благодаря возможностям субмикронных объемных технологий; 17) отсутствие обоснованности выбора прямоугольной формы радиоимпульсов для опрашивающего сигнала; при этом использование других возможных форм радиоимпульсов не проанализировано; 18) ограничение рассматриваемых датчиков только такими, единственной функцией которых является измерение температуры; в тоже время очень интересным является функционирование элементов измерения температуры в составе датчиков

различных параметров; 19) полное отсутствие в автореферате рисунков, изображающих анализируемые резонаторы; поэтому не совсем понятно, сколько встречно-штыревых преобразователей включает каждый резонатор (один или два), какой тип отражателей используется (с закороченными или незакороченными проводящими полосками) и как расположены резонаторы в паре на единой подложке; 20) не указаны геометрические параметры ВШП и отражателей; 21) весьма ограничен список пьезоэлектрических кристаллов, для которых проведен расчет, в автореферате не указывается, какие результаты могут быть получены для менее распространенных и новых материалов; 22) хотя, согласно введению и главе 1, чувствительный элемент датчика состоит из пары резонаторов на ПАВ, в главе 2 приведены результаты для одного резонатора и не описано, как повлияет наличие второго резонатора; 23) рассмотрение отсутствующих в диссертации вопросов по оценке изменения дальности действия датчиков, при продемонстрированном увеличении на 20% энергии отклика, могло бы значительно повысить практическую значимость работы; 24) не поясняется, за какое время температура предлагаемого чувствительного элемента достигает температуры измеряемого объекта при ее изменении; 25) отсутствует информация о времени, необходимом для опроса датчика; 26) есть ряд грамматических ошибок; например на стр. 3 в 5 строчке сверху не хватает запятой в причастном обороте; на стр. 10 в 13 строчке сверху необходимо писать «работ опубликовано в изданиях»; 27) название диссертации «Чувствительные элементы беспроводных пассивных датчиков температуры на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах» выглядело бы более логичным.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим образом.

1. Доктор технических наук, с.н.с. В.С. Орлов является крупным специалистом в области устройств обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. Его научные интересы распространяются также на вопросы выбора радиоматериалов для получения наилучших характеристик устройств на ПАВ и методы проектирования резонаторов на ПАВ, что соответствует направленности

диссертационного исследования А.С. Швецова. Работы В.С. Орлова по тематике диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных изданиях.

2. Кандидат технических наук Т.В. Сеницына является крупным специалистом в области проектирования радиоэлектронных компонентов на поверхностных акустических волнах и их применения в радиотехнических устройствах. В сфере научных интересов Т.В. Сеницыной, в частности, находятся вопросы оптимизации конструктивных параметров резонаторов на ПАВ, которые соответствуют одной из сторон диссертационного исследования А.С. Швецова. Работы Т.В. Сеницыной по тематике диссертации опубликованы в ведущих научных изданиях.

3. АО «НИИ «Элпа» является одним из ведущих разработчиков и производителей акустоэлектронных устройств, в том числе устройств на поверхностных акустических волнах. Предприятие известно работами в области конструирования и технологии производства резонаторов на ПАВ, продолжающихся и в настоящее время.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований предложен метод расчета отклика резонатора на ПАВ при его импульсном опросе, с его использованием определена максимально возможная эффективность переизлучения энергии резонатором на ПАВ и определены соотношения параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта, при которых она достигается; разработан метод выбора подложки резонаторов на ПАВ для получения максимальной энергии отклика и максимальной чувствительности информационного параметра отклика к температуре, при его применении обнаружены подложки, позволяющие получить температурную чувствительность разности резонансных частот пары резонаторов на ПАВ в несколько раз больше, чем при использовании ранее известных подложек; предложена новая конструкция чувствительного элемента датчика температуры для систем телеметрии с размещением на одной подложке пары резонаторов на ПАВ, в которых используются ПАВ с различной поляризацией, что позволяет получить более сильное различие температурного коэффициента частоты резонаторов на ПАВ и минимизировать занимаемую ими площадь.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс методов математического анализа, линейной алгебры, дискретного преобразования Фурье, методов теории электрических цепей. В результате определены максимально достижимые значения разницы ТКЧ резонаторов на ПАВ при различных значениях требуемого КЭМС для наиболее широко используемых пьезоэлектрических материалов; установлено, что при импульсном опросе резонатора на ПАВ существует максимально возможная эффективность переизлучения энергии и определены параметры резонатора на ПАВ, при которых возможно достижение максимальной эффективности переизлучения энергии. Подробно изучена взаимосвязь параметров резонатора на ПАВ и эффективности переизлучения энергии при импульсном опросе.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что представлены рекомендации для разработчиков систем телеметрии по выбору материала и ориентации пьезоэлектрической подложки для резонатора на ПАВ, используемого в качестве чувствительного элемента датчика температуры, и рекомендаций по выбору соотношений параметров резонатора на ПАВ и параметров радиотехнического тракта. Использование данных рекомендаций позволяет получить максимальную энергию отклика датчика при требуемой зависимости параметров отклика от температуры. Предложена для использования в датчиках температуры новая подложка из кварца (отличающаяся от ранее известных подложек ориентацией относительно кристаллографических осей), позволяющая получить значительно бóльшую разницу температурных коэффициентов частоты пары резонаторов, чем у известных аналогов. Результаты работы использованы в разработке беспроводного пассивного датчика температуры для имплантации в живые организмы при выполнении ОКР в АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург); использованы для выбора ориентации подложек и проектирования резонаторов на ПАВ при выполнении ОКР «Беспроводные сенсоры на поверхностных акустических волнах для контроля физических параметров в широком диапазоне температур» в ОАО «Фомос-Материалс» (Москва).

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что результаты обоснованы адекватным применением математического аппарата, корректными исходными данными и принятыми допущениями, согласованностью между теоретическими результатами, полученными различными методами, и согласованностью между теоретическими и экспериментальными результатами; теория построена на известных общепринятых научных положениях; использованы хорошо зарекомендовавшие себя методологические подходы широко известные в области устройств на поверхностных акустических волнах.

Личный вклад соискателя состоит в получении всех основных научных результатов диссертации; апробации результатов исследования на шести научных и научно-технических конференциях, в том числе международных; публикации основных результатов диссертации в тринадцати статьях научных изданий, входящих в перечень ВАК.

На заседании 21 сентября 2017 года диссертационный совет принял решение присудить Швецову А.С. ученую степень кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек (из них 7 докторов наук по профилю защищаемой диссертации), участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 14, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель

диссертационного совета Д 219.001.04

Аджемов Артем Сергеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 219.001.04

Терешонок Максим Валерьевич



«21» сентября 2017 г.