

Утверждаю



заместитель генерального директора

АО «НИИ «Элпа»

Локтев В.А.

2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

«Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Элпа» с опытным производством» (АО «НИИ «Элпа») на диссертацию Швецова Александра Сергеевича «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Комиссия в составе: д.ф.-м.н. Анисимкина В.И., к.ф.-м.н. Валянского К.И., к.т.н. Голубского А.А. и Галанова Г.Н. рассмотрела представленные диссертацию, автореферат и опубликованные автором работы. По результатам рассмотрения материалов диссертации Швецова Александра Сергеевича «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры» принято следующее заключение.

Актуальность темы. Дистанционные беспроводные измерения радиотехническими методами параметров сред настоятельно требуют совершенствования возможностей измерений в различных условиях и средах путем расширения типов измерительных систем. Во многих отраслях народного хозяйства для определенных типов измерений хорошо зарекомендовали себя измерения на основе опроса по радиоканалу датчиков, основанных на использовании поверхностных акустических волн (ПАВ). Однако, к настоящему времени количество примеров успешного практического применения таких систем и объем производства серийно выпускаемого оборудования еще очень

Вход. № 15/17
«29» 08 2017 г.
подпись

ограничены. В связи с растущими потребностями медицины в имплантируемых датчиках, энергетики – в высокотемпературных датчиках, ядерной отрасли – в датчиках, слабо подверженных влиянию ионизирующих излучений, необслуживаемые, пассивные и долговечные датчики на основе устройств на ПАВ являются привлекательными кандидатами. А задача исследования путей совершенствования чувствительных элементов, в частности, резонаторов на ПАВ, на основе которых строятся эти датчики, является актуальной. Так как беспроводное измерение температуры различных объектов является одним из наиболее востребованных применений таких датчиков, то выбор этого направления в качестве темы диссертации является оправданным и актуальным.

Научная новизна. В работе впервые проведен анализ зависимости энергии переизлученного датчиком сигнала от параметров резонатора на ПАВ и подключенного к нему радиотехнического тракта, выведено ранее неизвестное соотношение их параметров, при которых энергия переизлученного сигнала максимальна. Показана возможность получения большей энергии отклика, чем при традиционно используемом согласовании по равенству активных компонентов входного импеданса радиотехнического тракта и импеданса резонатора.

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; определены области ориентации подложек, позволяющие получить сочетания наибольшей чувствительности резонансной частоты к температуре и эффективности переизлучения энергии опрашивающего сигнала.

В экспериментальном плане новизна данной диссертационной работы отражается в опубликованном совместном использовании для чувствительного элемента датчика двух различных типов волн: волны Рэлея и волны Гуляева-Блюштейна, позволившим получить на одной подложке разницу ТКЧ, превышающую 130 миллионных долей на градус Цельсия, что значительно выше, чем у ранее предлагавшихся пар резонаторов на ПАВ. Особенность найденной ориентации подложки, выражающаяся в параллельном распространении использованных волн, является интересным результатом с точки зрения сокращения габаритов этих устройств.

Теоретическая значимость. В диссертации проведено сравнение результатов численного моделирования с использованием метода связанных мод и приближенного аналитического расчета с использованием эквивалентной схемы резонатора на ПАВ. Сравнение данных методов показало применимость замещения резонатора эквивалентной схемы для расчета энергии переизлученного сигнала, что позволяет вывести приближенные соотношения параметров резонатора и радиотехнического тракта, при которых данная энергия максимальна.

На основе анализа результатов расчета параметров ПАВ определены максимально достижимые значения разницы температурных коэффициентов частоты (ТКЧ) в зависимости от требуемого значения коэффициента электромеханической связи (КЭМС) для четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических материалов.

Практическая значимость. Современные системы измерения температуры с беспроводным опросом датчиков на ПАВ по радиоканалу не имеют достаточно широкой номенклатуры материалов для получения разных уровней чувствительности, в частности, в большинстве случаев для чувствительных элементов выбираются готовые пьезоэлектрические подложки из материалов, применяемых для массового изготовления резонаторов на ПАВ с уже заданными ориентациями пьезоэлектрических кристаллов. Обычно используются пары резонаторов с различной ориентацией, а информационным параметром служит разность частот резонаторов, изменение которой определяется значениями ТКЧ. В данной диссертации проведено исследование всех возможных ориентаций основных пьезоэлектрических кристаллов, применяемых для устройств на ПАВ. Теоретически рассчитаны все параметры ПАВ, необходимые для выбора и проектирования пар резонаторов, в том числе, и для пар, изготовленных на одной общей подложке с разными направлениями распространения ПАВ. Последнее свойство позволяет резко снизить стоимость чувствительного элемента. 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.

Другой проблемой систем с дистанционным опросом пассивных датчиков является дальность работы, ограниченная энергетической эффективностью

переизлучения электромагнитной энергии датчиком, подключенным к антенне. С точки зрения рассматриваемых в данной диссертации чувствительных элементов на резонаторах на ПАВ вопрос сводится к выбору соотношения активной части импеданса резонатора и активной части входного импеданса подключенного к нему радиотехнического тракта (в частности, импеданса непосредственно подключенной к резонатору антенны). Несмотря на кажущуюся тривиальность вопроса, 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. В диссертации даны конкретные рекомендации по подбору параметров резонаторов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций и результатов работы выражается в тщательной экспериментальной проверке теоретических положений и расчетов на различных конструкциях резонаторов, спроектированных и изготовленных на подложках выбранных ориентаций. Результаты измерений, с достаточной точностью совпадающие с результатами расчета, подтверждают правильность расчетных параметров, используемых при конструировании резонаторов на ПАВ.

Содержание работы. В 1-й главе диссертации описаны ранее опубликованные результаты, относящиеся к датчикам температуры на основе различных устройств на ПАВ. Автор подробно анализирует изложенные в публикациях данные о типах применяемых устройств: резонаторов, линий задержки и об их свойствах. В главе детально обсуждаются опубликованные подходы к выбору материала и ориентации подложек для различных типов устройств на ПАВ. Автор приходит к обоснованным выводам о том, что в качестве чувствительных элементов датчиков с наименьшими габаритами целесообразно применять резонаторы на ПАВ, причем вопросы согласования резонаторов с радиотехническим трактом в опубликованных материалах проработаны недостаточно глубоко. Построение остальных глав диссертации обусловлено именно этими выводами.

Во 2-й главе рассматриваются вопросы энергетической эффективности переизлучения резонатором на ПАВ опрашивающего импульсного сигнала. На основании эквивалентной схемы резонатора на ПАВ, подключенного к радиотехническому тракту с определенным входным импедансом, проводится вывод аналитических формул, определяющих передачу энергии в этой системе.

Показано, что при высокой добротности резонаторов и достаточно большом коэффициенте связи возможно достижение максимально возможной эффективности на частотах как вблизи последовательного резонанса, так и вблизи параллельного резонанса. При этом оптимальное значение входного сопротивления радиотехнического тракта приближается к удвоенному значению сопротивления резонатора на последовательном резонансе или к половинному значению сопротивления резонатора на параллельном резонансе. Этот вывод не только уточняет рекомендации к выбору сопротивлений, но и расширяет возможности выбора конструкции антенн, подключаемых к резонатору для дистанционного опроса. Достоверность выведенных аналитических соотношений с точки зрения правильности и возможности применения с реальными резонаторами, численно рассчитываемыми для реальных кристаллов, проверена в диссертации путем сравнения результатов аналитических и численных расчетов, в которых учтены все особенности частотных характеристик, в том числе, основные и паразитные резонансы.

В 3-й главе проводится анализ важнейших свойств поверхностных акустических волн на всех возможных ориентациях пьезоэлектрических кристаллов. В рассмотрение включены кристаллы ниобата лития, танталата лития, лангасита и кварца. Для всех этих материалов рассчитаны контурные карты скорости, коэффициента электромеханической связи, температурного коэффициента времени задержки и угла отклонения потока энергии, что позволяет выбрать ориентации подложек, перспективные с точки зрения создания резонаторов для датчиков температуры. В результате проведенного анализа сделан вывод о наибольшей привлекательности кварца для размещения пар резонаторов на единой подложке. Выбран диапазон ориентаций подложек кварца, для которых может быть достигнута разность ТКЧ двух резонаторов $150 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

4-я глава посвящена рассмотрению особенностей экспериментально измеренных характеристик резонаторов, спроектированных в процессе работы над диссертацией. Результаты эксперимента с резонаторами на подложках с выбранными ориентациями детально сравниваются с расчетными данными. Показано, что для большинства новых ориентаций результаты измерения ТКЧ резонаторов по отдельности и разницы ТКЧ пар резонаторов на единой подложке с удовлетворительной точностью совпадают с результатами расчета. Этим подтверждается достоверность данных расчета и рекомендаций, изложенных в диссертации.

В приложении содержатся материалы, не вошедшие в основной текст диссертации, и акты об использовании результатов в ОКР, проводимых АО «НПП «Радар ММС» и ОАО «Фомос-Материалс».

Работа выполнена на высоком профессиональном уровне и заслуживает в целом положительной оценки. В то же время она не лишена и ряда недостатков.

Замечания по работе.

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.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и существенно не снижают уровень диссертационной работы.

Общее заключение по работе. Диссертация Швецова А.С. «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, ее содержание соответствует пунктам 9 и 10 паспорта специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе

системы и устройства телевидения», автореферат полностью отражает содержание диссертации. Считаем, что Швецов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании Научно-технического совета АО «НИИ «Элпа» 05 июля 2017 г., протокол № 4/2017 г.

Отзыв подготовили:

Анисимкин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, 01.04.10 – «Физика полупроводников и диэлектриков», ведущий научный сотрудник научно-производственного комплекса 1 (НПК-1); Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Элпа» с опытным производством», Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, тел.: +7 (495) 626-72-83; e-mail: anis@cpire.ru

Валянский Константин Иванович, кандидат физико-математических наук, 01.04.02 – «Теоретическая и математическая физика», ведущий научный сотрудник НПК-1, Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Элпа» с опытным производством»; Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, тел.: +7 (499) 710-13-33; e-mail: dalz@yandex.ru

Голубский Александр Алексеевич, кандидат технических наук, 05.17.16 – «Технология полупроводников и материалов электронной техники», заместитель директора НПК-1 по научной работе; Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Элпа» с опытным производством», Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, тел.: +7 (499) 710-13-33; e-mail: npk1@mail.ru

Галанов Геннадий Николаевич, директор НПК-1; Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Элпа» с опытным производством», Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д.10, тел.: +7 (499) 710-13-33; e-mail: npk1@mail.ru

Ведущий научный
сотрудник НПК-1



д.ф.-м.н. В.И. Анисимкин

Ведущий научный
сотрудник НПК-1



к.ф.-м.н. К.И. Валянский

Заместитель директора
НПК-1 по научной работе



к.т.н. А.А. Голубский

Директор НПК-1



Г.Н. Галанов