

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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»

Датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ) еще не нашли к настоящему времени достойных применений по причине недостаточной разработки этого предмета. Учитывая потенциальные возможности датчиков на ПАВ в энергетике, технике, биомедицинских применениях и на транспорте, потребность в них будет возрастать по мере их совершенствования и доступности. Исследование же резонаторов на ПАВ в качестве чувствительных элементов таких датчиков является актуальным.

Научная новизна. Анализ зависимости энергии переизлученного датчиком сигнала от соотношения между резонансным сопротивлением резонатора и активным входным сопротивлением подключенного к нему радиотехнического тракта является новым и представляет интерес с теоретической точки зрения, так как он расширяет представления о возможностях выбора параметров резонаторов при заданных параметрах радиотехнического тракта.

В работе проведены расчеты характеристик ПАВ для многих возможных ориентаций монокристаллов кварца, ниобата лития, танталата лития и лангасита, используемых в качестве подложек резонаторов. Такая полнота объема данных полученных и проанализированных в работе является новой, так как опубликованные ранее работы других авторов

ограничивались лишь некоторыми ориентациями, интересными для конкретных применений этих авторов.

На основе проведенного анализа, автором впервые обнаружены ориентации, перспективные для создания датчиков температуры с температурным коэффициентом частоты, существенно превышающим 100 миллионных долей на градус Цельсия. Эти ориентации впервые использованы для изготовления подложек и их свойства тщательно изучены экспериментально.

К важному новому результату следует отнести экспериментальное доказательство возможности использования на единой подложке резонаторов на ПАВ с волнами Релея и с волнами Гуляева-Блюштейна. Такие комбинации до этой работы не публиковались.

Теоретическая значимость работы отражена в обработке большого объема расчетных данных, позволившей осуществить выбор конкретных ориентаций и выбора комбинаций материалов для различных диапазонов температур. Теоретический интерес также представляет проведенное в работе подробное изучение особенностей одновременно применяемых волн Гуляева-Блюштейна и волн Рэлея.

Практическая значимость диссертации подкрепляется патентом РФ, защищающим права авторов и производителей систем измерения температуры на особенно привлекательные свойства ориентации кварца, позволяющей получать ранее недостижимую разницу температурных коэффициентов частоты на единой подложке при минимальных габаритах чувствительного элемента, содержащего пару резонаторов. Имеются акты об использовании результатов диссертации в ОКР производителей подложек и производителей электронных систем. Результаты исследования в диссертации энергетических соотношений при опросе резонаторов

импульсным сигналам привели к важным рекомендациям по выбору параметров резонаторов.

Экспериментальная проверка результатов расчетов, и поверка численными методами аналитических выкладок подтверждают обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Диссертация состоит из четырех глав, заключения и приложений. Первая глава диссертации дает подробный аналитический обзор материала опубликованного ранее по тематике датчиков на ПАВ. В главе обосновывается выбор резонаторов в качестве основы для создания чувствительных элементов беспроводных датчиков температуры и выбирается круг вопросов, наиболее важных для развития этого направления.

Энергетической эффективности переизлучения резонатором, опрашивающего импульсного сигнала посвящена вторая глава. На основании аналитических выкладок в диссертации показано, что при относительно невысокой добротности резонатора на ПАВ переизлученная энергия в несколько раз меньше, чем достижимое значение, а при относительно высокой добротности условия максимизации энергии могут значительно отличаться от условия равенства активных составляющих импедансов антенны и резонатора. В работе приводятся рекомендации по выбору параметров резонаторов, которые в свою очередь трансформируются в требования к материалам.

Третья глава – самая большая по объему, содержит расчеты релевантных параметров основных пьезоэлектрических кристаллов, нашедших применение в фильтрах и датчиках на ПАВ. Расчеты произведены для многих возможных ориентаций подложки, для всех невытекающих ПАВ. Тщательный анализ возможных комбинаций, проведенный в этой главе, позволяет выбрать для большинства спецификаций датчиков температуры на

ПАВ наиболее приемлемые ориентации пар резонаторов на единой подложке. Для повернутого на 70 градусов Y-среза предложены ориентации резонаторов на волне Рэлея и на волне Гуляева-Блюштейна, обладающие уникальными свойствами, максимальной разницей температурных коэффициентов частоты и параллельным направлением потока энергии обеих волн, что обеспечивает минимальные размеры пары резонаторов на кристалле.

В четвертой главе приводятся экспериментальные результаты по измерению параметров резонаторов, индивидуально сконструированных для предложенных в работе ориентаций. Сравнение результатов измерений с расчетными параметрами показало справедливость расчетных подходов для поиска ориентаций с заданной разницей ТКЧ пар резонаторов на единой подложке. Этим поверяется достоверность данных расчета и рекомендаций изложенных в диссертации.

Диссертационная работа выглядит логично спланированным и завершенным научным исследованием.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Отсутствие в тексте подробного описания характеристик разработанных в диссертации конструкций резонаторов на ПАВ.
2. Исследование вопросов согласования резонаторов с радиотехническим трактом ограничено рассмотрением радиотехнического тракта с чисто активным входным 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.

Однако отмеченные недостатки не снижают высокий уровень диссертационной работы в целом.

Диссертация Швецова А.С. «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры» соответствует специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, автореферат отражает содержание диссертации полностью.

Считаю, что Швецов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Главный научный сотрудник

НИЛ 3303 «Акустоэлектронные устройства» НИЧ МТУСИ,

доктор технических наук, с.н.с.



Орлов В.С.

«26» июня 2017 г.

Телефон +7 (495) 957-77-19, электронная почта [filtrov.pav@yandex.ru](mailto:filtrov.pav@yandex.ru)

Подпись д.т.н., с.н.с. Орлова В.С. заверяю.

Ученый секретарь Ученого совета МТУСИ



Т.В. Зотова

Организация: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ); 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а; +7 (495) 957-79-17; [www.mtuci.ru](http://www.mtuci.ru) ; [mtuci@mtuci.ru](mailto:mtuci@mtuci.ru)

Специальность оппонента: 05.27.04 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах»