

На правах рукописи

ШВЕЦОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**РЕЗОНАТОРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В
КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БЕСПРОВОДНЫХ
ПАССИВНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре основ радиотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **Жгун Сергей Александрович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий НИЛ ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: **Орлов Виктор Семенович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, г. н. с. НИЧ ФГБОУ ВО МТУСИ

Синицына Татьяна Викторовна

кандидат технических наук, главный конструктор ООО «БУТИС»

Ведущая организация: Акционерное Общество «Научно-исследовательский

институт «Элпа» с опытным производством»

Защита диссертации состоится « 21 » сентября 2017 г. в 15 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, аудитория А-448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МТУСИ и на сайте <http://srd.mtuci.ru/index.php/council>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 219.001.04

кандидат технических наук _____ Максим Валерьевич Терешонок

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях все большее распространение получают системы телеметрии. Для таких систем необходимы датчики, среди которых наиболее востребованы пассивные датчики (без автономных элементов питания непосредственно в датчике, размещенном на объекте) информация с которых передается посредством электромагнитных волн. Такие датчики могут опрашиваться при отсутствии прямой видимости между датчиком и опрашивающим устройством и способны работать в широком диапазоне температуры и давления, в присутствии механических нагрузок, магнитных полей, ионизирующих излучений, под неблагоприятными воздействиями окружающей среды.

Этим требованиям хорошо отвечают датчики, чувствительными элементами которых являются устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Радиотехнические устройства данного типа могут совмещать функции датчика и устройства радиочастотной идентификации (РЧИД).

Чувствительные элементы датчиков на ПАВ и РЧИД на ПАВ можно разделить на две основные группы: устройства на основе линий задержки на ПАВ и устройства на основе резонаторов на ПАВ. Первые обладают большими возможностями для реализации функций РЧИД, вторые позволяют получить меньшие габариты устройства, большую точность измерений и дальность действия системы телеметрии.

Для одновременного беспроводного опроса множества датчиков с чувствительными элементами на основе резонаторов на ПАВ применяется частотное разделение. В этом случае для каждого из них частота сигнала, посредством которого опрашивается датчик, и частота сигнала, который излучает датчик, находится в своем диапазоне частот (рабочем диапазоне частот данного резонатора на ПАВ). Сумма ширины рабочих диапазонов частот всех резонаторов на ПАВ не превышает ширину рабочего диапазона частот системы.

С другой стороны ширина рабочего диапазона отдельного резонатора на ПАВ определяется его температурным коэффициентом частоты (ТКЧ) и диапазоном измеряемых температур. В итоге предпочтительное значение ТКЧ может быть различным в зависимости от диапазона измеряемых температур, количества опрашиваемых резонаторов на ПАВ и ширины рабочего диапазона частот системы.

Величина ТКЧ главным образом определяется физическими свойствами подложки резонатора на ПАВ, которые определяются используемым для ее изготовления пьезоэлектрическим радиоматериалом и ориентацией подложки относительно кристаллографических осей. Поскольку подложка влияет на сами электрические характеристики резонатора на ПАВ (а не только их температурную зависимость) ее выбор должен позволять одновременно с достижением требуемого ТКЧ также достигать требуемых значений параметров электрических характеристик. Среди таких параметров наиболее важным является энергия излучаемого датчиком сигнала, определяющая достижимое значение сигнал-шум, и, следовательно, ограничивающая точность измерения и дальность действия системы. Поэтому выбор подложки резонатора на ПАВ для различных требований к значению ТКЧ является актуальной задачей из области разработки технических основ проектирования и конструирования радиотехнических устройств (а именно, датчиков) для систем телеметрии, используемых в промышленности, биологии, медицине, метрологии и других областях применения.

Вопросы, касающиеся функционирования системы телеметрии в целом, погрешности измерения, дальности действия в диссертации не рассматриваются. В данной работе рассмотрены вопросы конструирования радиотехнических устройств на основе резонаторов на ПАВ, используемых в качестве чувствительных элементов датчиков температур, в том числе в системах телеметрии, предусматривающих опрос нескольких датчиков. При этом учтена особенность резонаторов на ПАВ, предназначенных для

указанного применения, которая заключается в специфических требованиях к зависимости характеристик резонатора на ПАВ от температуры.

Степень разработанности темы исследования. Среди ученых, заложивших основы использования в радиотехнике устройств на ПАВ вообще и резонаторов на ПАВ в частности, хотелось бы особо отметить Ю.В. Гуляева, Р.М. Уайта, М. Волтмера, Э. Аша. Исследование беспроводных пассивных датчиков температуры с чувствительными элементами на ПАВ проводилось многими научными группами. Основные принципы построения таких датчиков изложены в 90-х годах прошлого века в работах публикациях Л. Рэйндла, А. Поля, В. Буффа, П. Шольца и других авторов. Последние разработки в данной области представлены в публикациях Д. Малохи, М.П. да Кунхи, С. Балландра и иных исследователей. К теме данной работы наиболее близки публикации В.А. Калинина (касающиеся выбора соотношения параметров резонатора на ПАВ и входного импеданса радиочастотного тракта, к которому он подключен), В.И. Чередника и М.Ю. Двоешерстова (касающиеся выбора пьезоэлектрических подложек для чувствительного элемента на ПАВ). В работах этих и некоторых других авторов обсуждается выбор соотношения параметров чувствительного элемента и параметров радиочастотного тракта для частных случаев; рассматриваются конкретные подложки, отдельные группы подложек или отдельные типы ПАВ на различных подложках; при этом обобщающие выводы по данным вопросам отсутствуют.

Цели и задачи исследования. Целью данной работы является совершенствование резонаторов на ПАВ для получения максимальной энергии отклика и максимальной чувствительности информационного параметра отклика к температуре. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Определена зависимость энергии переизлученного датчиком сигнала от параметров резонатора на ПАВ и входного импеданса радиотехнического тракта, к которому он подключен.

2. Проведен расчет параметров ПАВ для всех возможных ориентаций подложки из четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических радиоматериалов и анализ результатов данного расчета. Определены ориентации подложек, имеющих наилучшие параметры для различных диапазонов измеряемой температуры, различной ширины рабочего диапазона частот системы и различного количества одновременно опрашиваемых датчиков.

3. Разработаны конструкции резонаторов на ПАВ для ряда подложек и проведены измерения их характеристик, в том числе для подложек, впервые предложенных в данной работе.

Научная новизна работы

1. Предложен метод расчета отклика резонатора на ПАВ при его импульсном опросе, учитывающий работу системы в двух различных режимах (в установившемся режиме во время действия опрашивающего импульса и в режиме переходного процесса во время приема отклика). С использованием метода определена максимально возможная эффективность переизлучения резонатором на ПАВ энергии электромагнитной волны и выведены соотношения параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта, при которых она достигается. При таком соотношении параметров энергия отклика выше, чем при обычно применяемом согласовании для установившегося режима.

2. Разработан метод выбора радиоматериала для подложки резонаторов на ПАВ и выбора ее ориентации для получения максимальной энергии отклика и максимальной чувствительности информационного параметра отклика к температуре. В результате использования метода обнаружены ориентации подложки, позволяющие получить в несколько раз большее

изменение разности резонансных частот пары резонаторов на ПАВ при изменении температуры, чем у ранее известных пар резонаторов на ПАВ.

3. Предложена новая конструкция чувствительного элемента датчика температуры для систем телеметрии. Особенностью предложенной конструкции данного радиотехнического устройства является размещение на одной подложке пары резонаторов на ПАВ, в которых используются ПАВ с различной поляризацией (волна Гуляева – Блюштейна (ВГБ) и квазиэрлеевская волна). Такие пары резонаторов на ПАВ имеют более сильное различие ТКЧ и занимают меньшую площадь, чем при использовании ПАВ с одинаковой поляризацией.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертации состоит в определении максимально достижимых значений разницы ТКЧ при различных значениях требуемого коэффициента электромеханической связи (КЭМС) для четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических радиоматериалов. Определена максимально возможная эффективность переизлучения резонатором на ПАВ энергии электромагнитной волны при его импульсном опросе и определены параметры резонатора на ПАВ, при которых возможно достижение максимальной эффективности переизлучения энергии.

Практическая значимость диссертации заключается в составлении рекомендаций 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 при проектировании датчика этих соотношений позволяет получить при импульсном опросе на 20% большую энергию отклика, чем в случае использования соотношений, характерных для согласования в установившемся режиме.

На основе разработанных рекомендаций по выбору подложки предложена подложка из $70^\circ Y$ -среза кварца (нормаль к поверхности этой подложки отклонена на 70° от кристаллографической оси Y в сторону кристаллографической оси Z). При использовании этой подложки достигается бóльшая разница ТКЧ пары резонаторов на ПАВ, чем при использовании ранее предложенных подложек: более чем на 25% для пары резонаторов на ПАВ, изготовленных на разных подложках; более чем в 5 раз для пары резонаторов на ПАВ, изготовленных на единой подложке. Это позволило, в частности, создать опрашиваемые электромагнитными волнами имплантируемые в живую ткань пассивные датчики температуры с точностью измерения $0,1^\circ\text{C}$ в диапазоне $30..45^\circ\text{C}$ для применения в медицине и биологии.

Результаты диссертационной работы использованы: 1) в АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург) при выполнении ОКР «Нерв» (государственный контракт №12411.1006899.11.074 от 14.05.2012 г.); 2) в ОАО «Фомос-Материалс» (Москва) при выполнении ОКР «Беспроводные сенсоры на поверхностных акустических волнах для контроля физических параметров в широком диапазоне температур» (государственный контракт №02.527.12.0006 от 12.05.2009 г. в рамках участия РФ в 7-й Европейской рамочной программе).

Методология и методы исследования. В работе использовались методы математического анализа, методы линейной алгебры, дискретное преобразование Фурье, методы теории электрических цепей, метод конечных элементов для решения волнового уравнения. Проведена экспериментальная проверка наиболее значимых результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Максимальное значение энергии электромагнитной волны, излучаемой датчиком после окончания опрашивающего импульса, не превышает 60% от максимально возможной энергии, накопленной в резонаторе на ПАВ при заданных параметрах радиотехнического тракта и опрашивающего сигнала.

2. Энергия электромагнитной волны, излучаемой датчиком после окончания опрашивающего импульса, может достигать максимального значения при условии, что произведение добротности и коэффициента связи резонатора на ПАВ составляет не менее 4.

3. Согласование резонатора на ПАВ с радиотехническим трактом для импульсного опроса датчиков позволяет получить на 20% большую энергию электромагнитной волны, излучаемой датчиком после окончания опрашивающего импульса, чем в случае использования при импульсном опросе согласования для установившегося режима.

4. Использование $70^\circ Y$ -среза кварца для изготовления на единой подложке пары резонаторов на ПАВ дает возможность получить разность ТКЧ более $130 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Для сравнения: наибольшая разность ТКЧ у ранее предлагавшихся для использования в системах телеметрии пар резонаторов на ПАВ, изготовленных на единой подложке, составляет $24 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ (т.е. ниже в 5,4 раза).

5. Резонатор на ПАВ, радиоматериалом подложки которого является кварц, а ориентация подложки определяется углами Эйлера ($0, 160^\circ, 90^\circ$), имеет положительный ТКЧ, превышающий $80 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Его использование в сочетании с известными резонаторами на ПАВ, имеющими ТКЧ $-95 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, позволяет получить разность ТКЧ более $175 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Для сравнения: наибольший положительный ТКЧ у ранее предлагавшихся резонаторов на ПАВ составляет $38 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, что позволяет получить разность ТКЧ $133 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ (т.е. ниже на 24%).

Достоверность результатов работы подтверждается совпадением результатов расчетов, проведенных с использованием различных методов, существенно отличающихся друг от друга, и соответствием результатов расчетов по предложенным методам и результатов экспериментов.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы обсуждались на шести конференциях: Перспективные системы и задачи управления (Красная Поляна, 2014), IEEE International Ultrasonics Symposium (Чикаго, США, 2014), SAW Symposium (Вена, Австрия, 2014), IEEE International Ultrasonics Symposium (Тайбэй, Тайвань, 2015), European Frequency and Time Forum (Йорк, Великобритания, 2016), Электромагнитное поле и материалы (Москва, 2016).

Всего по теме диссертации опубликовано 19 печатных работ. Из них 13 работ в опубликовано изданиях, входящих в перечень ВАК (в том числе 11 работ в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 1 патент на изобретение), 4 в трудах конференций и 2 в тезисах конференций (в том числе 1 в электронном виде). Доля авторского участия соискателя в работах [1, 14, 15] составляет 75 %; в работах [2, 16] составляет 50 %; в работах [3 – 10, 17 – 19] составляет 25 %; в работах [11 – 13] составляет 10 %. Личный вклад автора диссертации: 1) разработка метода расчета отклика резонатора на ПАВ при его импульсном опросе и его реализация; 2) написание программы для расчета частотных характеристик устройств на ПАВ и разработка с ее использованием конструкций резонаторов на ПАВ; 3) анализ результатов измерения характеристик резонаторов на ПАВ; 4) разработка и реализация метода выбора материала и ориентации подложки для резонаторов на ПАВ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертации, показана ее актуальность и охарактеризована ее разработанность; сформулированы цель и задачи исследования, описаны используемые методы; перечислены результаты работы, имеющие научную новизну, представляющие теоретическую и практическую значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту; охарактеризована достоверность полученных результатов и описана их апробация.

В первой главе описана структура и типы систем измерения температуры с беспроводными пассивными датчиками на ПАВ; проведен анализ публикаций, касающихся темы диссертации. Обозначено, что в диссертации будут рассматриваться вопросы конструкции чувствительных элементов для систем измерения с передачей сигнала по открытому радиоканалу, внимание будет сосредоточено на точности измерения температуры, близкой к комнатной, и минимизации размера датчика. Подробно рассмотрены публикации, касающиеся конструкции чувствительных элементов и выбора их материала. Кратко рассмотрены публикации, касающиеся конструкции остальных компонентов системы измерения, методов опроса и практического применения этих устройств.

Для получения максимальной точности измерения и минимального размера чувствительного элемента лучше подходят резонаторы на ПАВ. При передаче сигнала по открытому радиоканалу предпочтительным является опрос резонаторов на ПАВ импульсным сигналом с приемом излучаемого датчиком сигнала в течение некоторого времени после окончания опрашивающего импульса. Откликом датчика являются свободные колебания в подключенном к радиотехническому тракту резонаторе на ПАВ, а информационным параметром является их частота f_0 . Наиболее распространенным методом обработки отклика является преобразование

Фурье и определение частоты, на которой модуль спектральной плотности максимален. В других используемых методах для определения значения частоты также используется обработка всего отклика. Поэтому при рассмотрении таких систем в целом отклик датчика лучше всего характеризует его полная энергия.

В практически используемых системах применяют чувствительные элементы, состоящие из пары резонаторов на ПАВ с различным ТКЧ. Точность измерения температуры посредством измерения разности частот их откликов многократно выше точности измерения температуры посредством измерения частоты отклика единственного резонатора на ПАВ. Опрос каждого из резонаторов на ПАВ производится отдельными радиоимпульсами прямоугольной формы, частота которых приближается к f_0 , а длительность превышает длительность переходного процесса в резонаторе на ПАВ.

Зависимость f_0 от температуры определяется в основном свойствами подложки резонатора на ПАВ, зависящими от ее материала и ее ориентации относительно кристаллографических осей. Максимальное и минимальное измеренные и опубликованные значения ТКЧ составляют $38 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ и $-95 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, соответственно. Разница ТКЧ такой пары резонаторов на ПАВ составляет $133 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Для минимизации размера устройства наибольший интерес представляют пары резонаторов на ПАВ, размещенные на единой подложке. Наибольшая разница ТКЧ у ранее предложенных пар резонаторов на ПАВ, изготовленных на единой подложке, составляет $24 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Во второй главе проведено теоретическое исследование влияния параметров резонатора на ПАВ и входного импеданса радиотехнического тракта на энергию отклика при импульсном опросе датчика. Расчет проводимости резонатора на ПАВ производился с использованием метода связанных мод: $Y = H_{23}H_{42}/H_{22} - H_{43}$, где H_{mn} – элементы матрицы $[H]$, связывающая напряжения, токи и амплитуды акустических волн на краях резонатора. $[H]$ является произведением матриц, соответствующих

отдельным компонентам резонатора, $[H]_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$, где N – число компонент): $[H] = \prod_{i=1}^N [H]_i$. Для ВШП длины L матрица $[H]_i$ имеет вид:

$$\left(\begin{array}{cc} \cos(\theta_p L) - j \frac{\theta_u}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & -j \frac{k_{12}}{\theta_p} \sin(\theta_p L) \\ j \frac{k_{12}^*}{\theta_p} \sin(\theta_p L) & \cos(\theta_p L) + j \frac{\theta_u}{\theta_p} \sin(\theta_p L) \\ 0 & 0 \\ \frac{4\zeta}{\theta_p} \left\{ \left(\frac{\theta_u - k_{12}^*}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] + j \sin(\theta_p L) \right\} & -\frac{4\zeta}{\theta_p} \left\{ \left(\frac{\theta_u - k_{12}}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] - j \sin(\theta_p L) \right\} \\ \\ \frac{\zeta}{\theta_p} \left[\left(\frac{\theta_u - k_{12}}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] + \sin(\theta_p L) \right] & 0 \\ \frac{\zeta}{\theta_p} \left[\left(\frac{\theta_u - k_{12}^*}{\theta_p} \right) [1 - \cos(\theta_p L)] - \sin(\theta_p L) \right] & 0 \\ 1 & 0 \\ \left\{ 8 \left(\frac{\zeta}{\theta_p} \right)^2 [\theta_u - \operatorname{Re}(k_{12})] \left(1 - \frac{\sin(\theta_p L)}{\theta_p L} \right) - \omega C_{IDT} \right\} jL & 1 \end{array} \right),$$

где $\theta_p = \sqrt{\theta_u^2 - |k_{12}|^2}$, $\theta_u = \left(\frac{\omega}{V_{ref}} + k_{11} \right) \left(1 - j \frac{\alpha_\lambda}{40\pi \lg(e)} \right) - \frac{\pi}{p}$, ω – циклическая частота, p – шаг электродов, α_λ – затухание ПАВ за счет потерь на расстоянии, равном длине волны, (определяется из экспериментальных данных), параметры V_{ref} , k_{11} , k_{12} , ζ и C_{IDT} определяются в результате решения уравнений движения совместно с уравнениями пьезоэффекта и граничными условиями для бесконечной периодической структуры из электродов. Для расчета энергии отклика при импульсном опросе используется дискретизация опрашиваемого сигнала, дискретное преобразование Фурье, расчет спектра отклика, и обратное дискретное преобразования Фурье с учетом времени приема отклика.

Для определения основных тенденций влияния параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта на величину на эффективность переизлучения энергии проведен анализ цепи, в которой резонатор на ПАВ

замещен эквивалентной схемой Баттерворта – ван Дайка. Эффективность переизлучения энергии датчиком характеризуется показателем эффективности переизлучения $\eta = \frac{E_A}{W_{lim}}$; E_A – энергия отклика (энергия, рассеянная на входном сопротивлении радиотехнического тракта в процессе свободных колебаний); W_{lim} – максимально возможная величина энергии накопленной в резонаторе на ПАВ при заданных параметрах радиотехнического тракта и опрашивающего импульса. Графики зависимости η от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта $R_n = \frac{R_A}{rK_cQ}$ (R_A – входное сопротивление радиотехнического тракта; r , K_c и Q – параметры резонатора на ПАВ: сопротивление на частоте последовательного резонанса, коэффициент связи и добротность, соответственно) приведены на рисунке 1.

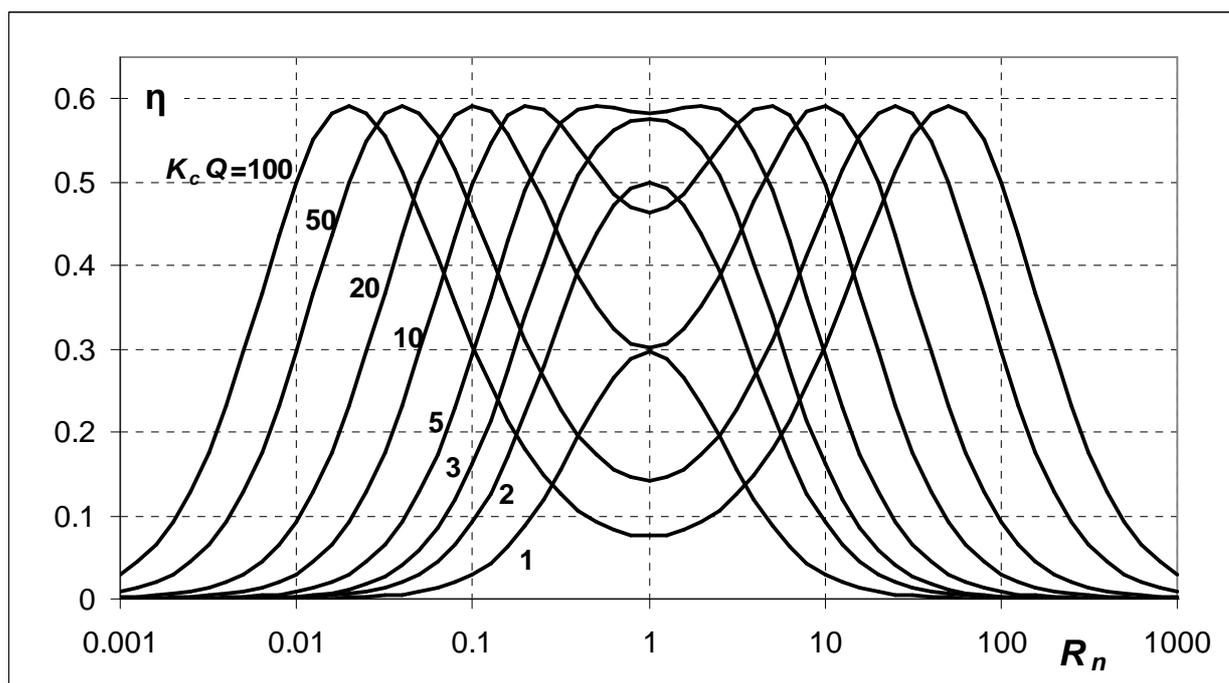


Рис. 1. Зависимость показателя эффективности переизлучения энергии η от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n

При использовании известного правила согласования импеданса для получения максимальной мощности в установившемся режиме накопленная в контуре энергия достигает W_{lim} , при этом $\eta = 50\%$. Максимальное отношение энергии отклика к запасенной в контуре энергии достигается при

выполнении условия $R_A = \sqrt{rR}$ ($R = r(K_c Q)^2$ – сопротивление резонатора на ПАВ на частоте параллельного резонанса). В случае $K_c Q \geq 4$ максимальное значение $\eta = \eta_{max} \approx 60\%$ достигается при компромиссных значениях сопротивления тракта, находящихся между \sqrt{rR} и значениями, соответствующими максимумам накопленной энергии. При $K_c Q < 4$ максимальное значение $\eta < \eta_{max}$ и достигается при $R_A = \sqrt{rR}$.

Применимость к резонатору на ПАВ выводов, полученных при анализе эквивалентной схемы, проверена численным расчетом энергии отклика для резонаторов на ПАВ с различными значениями их параметров. Результаты расчета обоими методами продемонстрировали их практически полное совпадение для резонаторов на ПАВ, используемых в датчиках. Примеры сопоставления результатов расчета двумя методами приведены на рисунке 2.

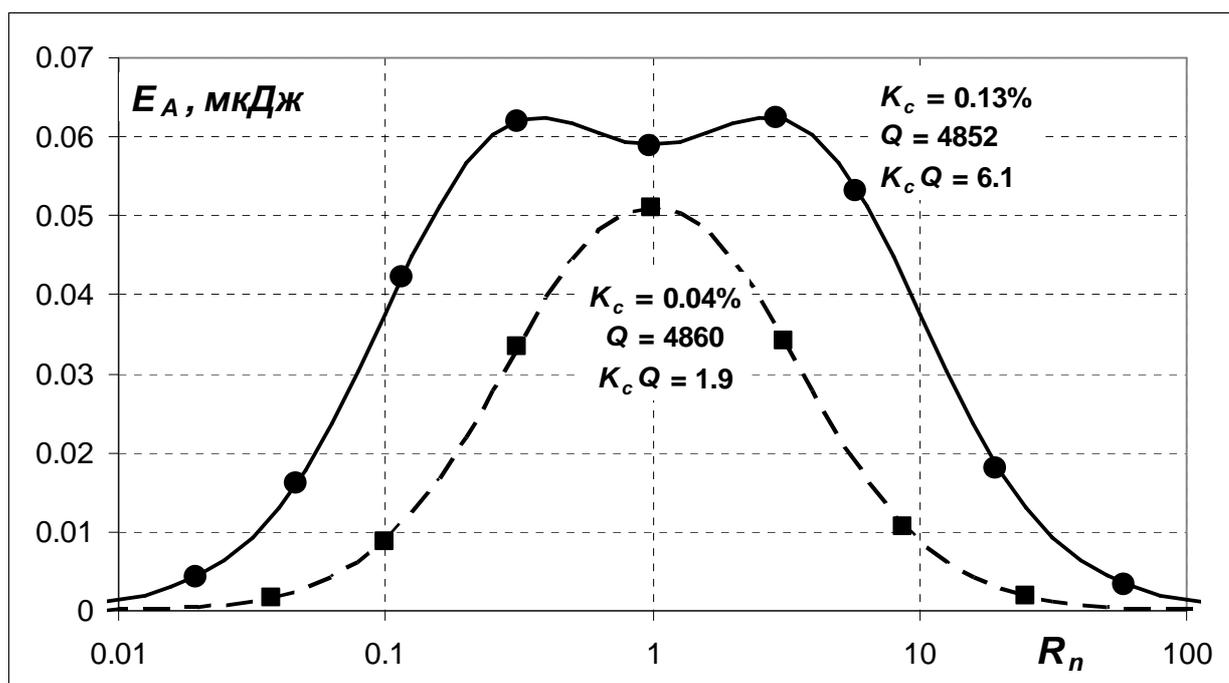


Рис. 2. Расчетная зависимость энергии переизлученного сигнала E_A для резонатора на ПАВ (точки) и для эквивалентного колебательного контура (линии) от нормированного входного сопротивления радиотехнического тракта R_n

Результатом второй главы являются рекомендации по выбору соотношения параметров резонатора на ПАВ и входного сопротивления радиотехнического тракта и определение влияния параметров резонатора на ПАВ на максимально достижимую эффективность переизлучения энергии.

В третьей главе проведено теоретическое исследование влияния ориентации подложки на параметры резонатора на ПАВ, наиболее важные для использования в беспроводном датчике температуры. Максимально достижимое значение K_c определяется величиной КЭМС K^2 , ТКЧ определяется главным образом температурным коэффициентом задержки (ТКЗ). Проведен расчет характеристик всех «невытекающих» ПАВ на четырех наиболее широко используемых пьезоэлектрических кристаллах: кварце, лангасите, танталате лития и ниобате лития.

Для достижения максимальной разности ТКЧ пары резонаторов на ПАВ на единой подложке Δ_{TCF} наиболее подходят подложки из кварца. Среди них наибольшие значения Δ_{TCF} позволяют получить подложки, ориентация которых находится в диапазоне от $60^\circ Y$ -среза до $85^\circ Y$ -среза. На данных срезах распространяется волна Гуляева – Блюштейна (ВГБ) с большим по модулю отрицательным ТКЗ, достигающим $-90 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. При изменении минимального требуемого значения КЭМС K_{\min}^2 от 0 до 0,13% максимально достижимые значения Δ_{TCF} изменяются от $150 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ до $63 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. При $K_{\min}^2 < 0,07\%$ направления распространения ПАВ с положительным ТКЗ мало отличается от направления распространения ВГБ, что позволяет разместить резонаторы на ПАВ почти параллельно и минимизировать занимаемую ими площадь подложки. Области ориентации подложки, позволяющие получать максимальную величину Δ_{TCF} и при заданном K_{\min}^2 или максимальный K_{\min}^2 при заданном значении Δ_{TCF} , приведены в Таблице 1.

При изготовлении пары резонаторов на ПАВ на двух разных подложках наибольшая разность их ТКЧ (до $188 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) достигается при использовании ВГБ на $70^\circ Y$ -срезе кварца в сочетании с подложкой из ниобата лития с ориентацией ($0, 70^\circ, 90^\circ$), на которой ТКЗ ПАВ достигает $98 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. При одинаковых значениях K_{\min}^2 разность ТКЧ такой пары

резонаторов на ПАВ превышает разность ТКЧ пары резонаторов на ПАВ, изготовленных на единой подложке, в 1,3..2,2 раза (на $45..100 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

Таблица 1. Рекомендуемые области ориентации подложки для изготовления пары резонаторов на ПАВ на единой подложке

Материал	Область углов Эйлера			$\Delta_{TCF}, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$K_{min}^2, \%$
	φ	θ	ψ		
кварц	0	160..175°	90°	95..150	0..0,07
			75..90°		
	0	150..160°	90°	63..95	0,07..0,13
			0..35°		
лангасит	0..30°	20..80°	(80..100°) – φ	40..57	0,1..0,23
			(135..155°) – φ		
	0..30°	140..170°	(20..35°) + φ	25..40	0,23..0,32
			-10..10°		
танталат лития	15..30°	75..90°	135..175°	23..28	0,25.. 0,5
			65..85°		
ниобат лития	0..25°	50..80°	80..95°	20..24	0,45..2,7
			5..30°		
	30°	90°	85..90°	< 20	2,7..4,2
			35..80°		

Результатом третьей главы являются рекомендации по выбору материала и ориентации подложки для резонатора на ПАВ, используемого в качестве чувствительного элемента датчика температуры.

В четвертой главе описаны результаты измерения параметров резонаторов на ПАВ, изготовленных на нескольких подложках из кварца и лангасита. Разработана конструкция для 17 резонаторов на ПАВ, изготавливаемых на 8 различных срезах кварца, в том числе на предложенных по результатам расчета подложках с наиболее высокими значениями Δ_{TCF} . На рисунке 3 приведены графики зависимости от температуры резонансных частот пары резонаторов на ПАВ, изготовленных на 70°Y -срезе кварца. Измеренное значение ТКЧ резонаторов на ПАВ, в которых используется ВГБ, (ориентация подложки (0, 160°, 90°)) превышает $80 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, измеренное значение Δ_{TCF} превышает $130 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$.

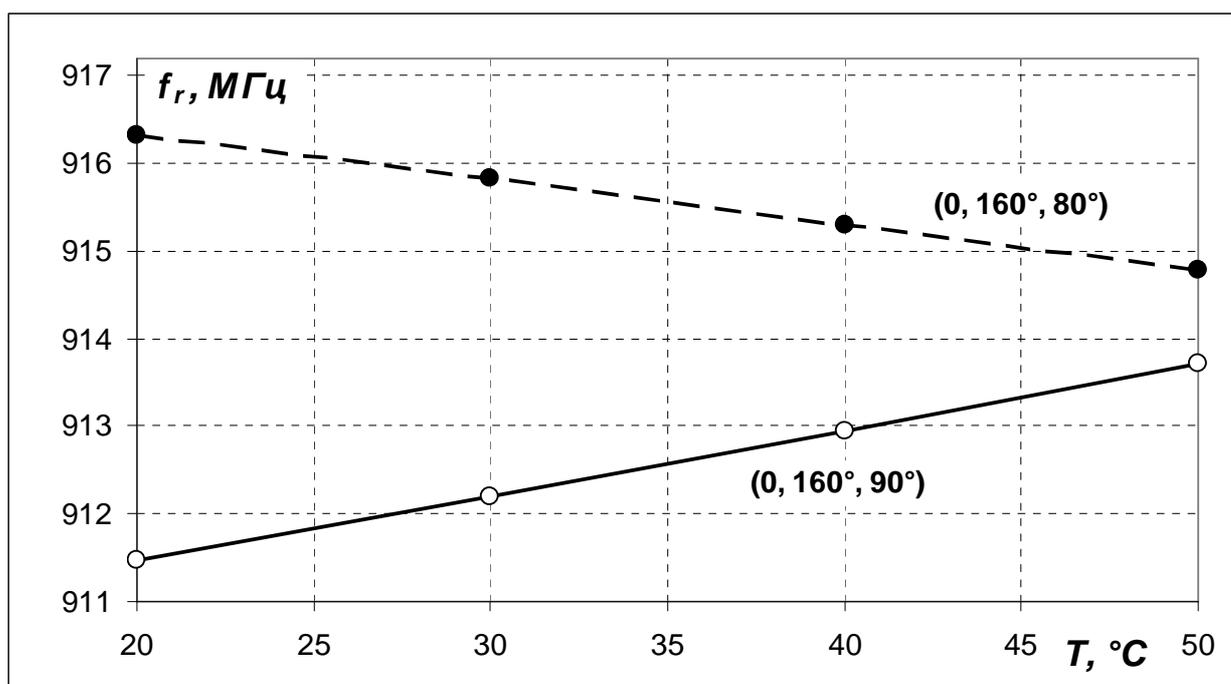


Рисунок 3. Зависимость резонансной частоты f_r пары резонаторов на ПАВ на $70^\circ Y$ -срезу кварца температуры T ; ориентация подложки $(0, 160^\circ, 80^\circ)$ соответствует распространению квазиэлеевской волны, ориентация подложки $(0, 160^\circ, 90^\circ)$ соответствует распространению ВГБ

У резонаторов на ПАВ, в которых используется ВГБ, получена величина $K_c Q$, позволяющая получить близкое к максимально возможному значение η . Для резонаторов на ПАВ, в которых используется квазиэлеевская волна, желательно повышение значения $K_c Q$. Компромисс между значением ТКЧ и параметрами, определяющими энергию отклика, достигается выбором направления распространения ПАВ. Зависимость параметров резонатора на ПАВ от направления распространения ПАВ (определяемого третьим углом Эйлера ψ) приведена на рисунке 4.

Результаты измерения ТКЧ резонаторов на ПАВ, изготовленных на различных подложках, продемонстрировали хорошее соответствие с результатами расчета. Подтверждена возможность изготовления резонаторов на ПАВ с приемлемыми для характеристиками на некоторых подложках, которые могут представлять интерес для практического использования в датчиках температуры. При рабочих частотах около 900 МГц могут достигаться значения Q около 6000. При этом во многих случаях значения $K_c Q < 4$ и для части применений актуален выбор подложек с большими

значениями K^2 (в соответствии с рекомендациями, сформулированными в предыдущей главе).

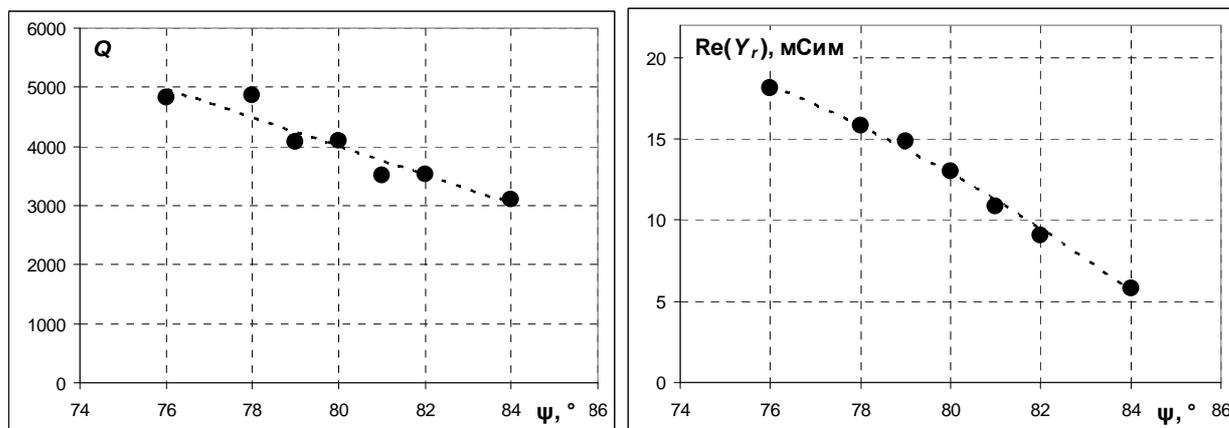


Рисунок 4. Зависимость измеренных значений добротности Q (слева) и проводимости на последовательном резонансе $Re(Y_r)$ (справа) от третьего угла Эйлера ψ

Результатом четвертой главы является экспериментальное подтверждение полученных результатов.

В заключении кратко описано проведенное в рамках диссертационной работы исследование, перечислены полученные результаты, изложены выработанные на основании их рекомендации, описаны перспективы дальнейшей разработки данной темы.

В приложении приведены акты о внедрении результатов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, и результаты расчета параметров ПАВ, не включенные в основной текст диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод расчета отклика датчика с резонатором на ПАВ при его импульсном опросе и разработан метод выбора радиоматериала для подложки резонаторов на ПАВ и выбора ее ориентации. В результате проведенного исследования сформулированы рекомендации по выбору материала и ориентации подложек для изготовления резонаторов на ПАВ, используемых в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры, и рекомендации по выбору соотношения параметров резонатора на ПАВ и радиотехнического тракта.

Для достижения максимальной энергии отклика следует использовать резонаторы на ПАВ с произведением $K_c Q$, близким к 4 или выше; при $K_c Q < 4$ следует использовать соотношение параметров $R_A = \sqrt{rR}$; при $K_c Q \gg 4$ использовать соотношение параметров $R_A \approx 2r$ или с $R_A \approx R/2$. Для достижения максимальной разности ТКЧ пары резонаторов на ПАВ, изготовленных на единой подложке, рекомендуется использовать подложки из кварца, ориентация которых находится в диапазоне от $60^\circ Y$ -среза до $85^\circ Y$ -среза. Для резонатора на ПАВ с положительным ТКЧ на этих срезах рекомендуется использовать ВГБ, а для резонатора на ПАВ с отрицательным ТКЧ – квазиэрлеевскую ПАВ, распространяющуюся под углом от 75° до 90° к оси X. Для достижения максимальной разности ТКЧ пары резонаторов на ПАВ, изготовленных на двух разных подложках, рекомендуется использовать ВГБ на $70^\circ Y$ -срезе кварца в сочетании с подложкой из ниобата лития, ориентация которой находится в диапазоне углов Эйлера от $(0, 70^\circ, 90^\circ)$ до $(0, 90^\circ, 90^\circ)$. Экспериментально проверена работоспособность пары резонаторов на ПАВ на $70^\circ Y$ -срезе кварца, получено ТКЧ более $80 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ у резонатора на ПАВ, использующего ВГБ, получена разность ТКЧ пары резонаторов на ПАВ более $130 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Shvetsov, A. Quartz orientations for optimal power efficiency in wireless SAW temperature sensors / A.Shvetsov, S.Zhgoon, I.Antsev, S.Bogoslovsky, G.Sapozhnikov // 2016 European Frequency and Time Forum. - 2016. - С.1. DOI: 10.1109/EFTF.2016.7477825
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. DOI: 10.1109/ULTSYM.2014.0372

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, опублик. 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. DOI: 10.1109/TUFFC.2014.006840
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. DOI: 10.1109/ULTSYM.2015.0356
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. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.486
7. Zhgoon, S. Monitored vacuum deposition of dielectric coatings over surface acoustic wave devices / S.Zhgoon, A.Shvetsov, K.Bhattacharjee, O.Legrani, P.Pigeat, O.Elmazria // Vacuum. - 2015. - T.116. - C.1. DOI: 10.1016/j.vacuum.2015.02.022
8. Штейнберг, О.М. Повышение чувствительности и точности измерителя крутящего момента вращающегося вала с электромагнитной связью с датчиком на ПАВ / О.М.Штейнберг, А.С.Швецов, С.А.Жгун, Г.Д.Лобов // Метрология (приложение к журналу «Измерительная техника»). - 2007. - N 12. - C.15.
9. Morgan, D.P. One-port SAW resonators using natural SPUDT substrates / D.P.Morgan, S.Zhgoon, A.Shvetsov, E.Semenova, V.Semenov // 2005 IEEE Ultrasonics Symposium. - 2005. - C.444. DOI: 10.1109/ULTSYM.2005.1602888

10. 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. DOI: 10.1109/ULTSYM.2006.475
11. Sakharov, S. Theoretical and experimental investigation of langasite as material for wireless high temperature SAW sensors / S.Sakharov, S.Kondratiev, A.Zabelin, N.Naumenko, A.Azarov, S.Zhgoon, A.Shvetsov // 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. - 2010. - C.535. DOI: 10.1109/ULTSYM.2010.5935533
12. Sakharov, S. Optimization of wafer orientation and electrode materials for LGS high-temperature SAW sensors / S.Sakharov, A.Zabelin, S.Kondratiev, D.Roshchupkin, D.Richter, H.Fritze, A.Shvetsov, S.Zhgoon // 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium. - 2012. - C.1525.
DOI: 10.1109/ULTSYM.2012.0381
13. Sakharov, S. Technological process and resonator design optimization of Ir/LGS High Temperature SAW Devices / S.Sakharov, A.Zabelin, A.Medvedev, O.Buzanov, S.Kondratiev, D.Roshchupkin, A.Shvetsov, S.Zhgoon // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. - 2014. - C.377.
DOI: 10.1109/ULTSYM.2014.0093

Публикации в материалах конференций

14. Швецов, А.С. Отражение поверхностных акустических волн от периодической последовательности металлических полосок на подложке из лангасита / А.С.Швецов, С.А.Жгун // XVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». - 2010. - Т.1. - С.24.
15. Швецов, А.С. Отражение поверхностных акустических волн от периодической последовательности металлических полосок / А.С.Швецов, С.А.Жгун // XII международная конференция по спиновой электронике и гировекторной электродинамике. - 2003. - С.495.
16. Швецов, А.С. Вопросы проектирования однопортовых резонаторов на материалах с естественной однонаправленностью / А.С.Швецов, С.А.Жгун, Г.Д.Лобов, О.М.Штейнберг, Д.П.Морган // XIV международная конференция

по спиновой электронике и гировекторной электродинамике. - 2005-2006. - С.344.

17. Трохимец, К.А. Пассивный беспроводной датчик температуры на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах / К.А. Трохимец, А.П.Тихонов, С.А.Жгун, А.С.Швецов // Материалы 9-й научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». - 2014. - С.412.

18. Antsev, I.G. Implantable acoustic wave sensors for surgery [Электронный ресурс] / I.G.Antsev, S.V.Bogoslovsky, G.A.Sapozhnikov, S.A.Zhgoon, A.S.Shvetsov / SAW Symposium. - 2014. - Режим доступа: <http://www.saw-symposium.com/wp-content/uploads/Implantable-acoustic-wave-sensors-for-surgery.pdf>

19. Жгун, С.А. Применение поверхностных акустических волн для создания беспроводных датчиков / С.А.Жгун, А.С.Швецов, Г.Д.Лобов, Дж.Ванг // Материалы XXIV международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». - 2016. - С.366.

