

На правах рукописи



Деркач Михаил Михайлович

БЕСПРОВОДНОЙ ДАТЧИК ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА
С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ
НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Специальность 05.27.01 –Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Корляков Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: Багдасарян Александр Сергеевич, доктор
технических наук, профессор, ФГУП «Научно-исследовательский институт радио» (НИИР)
(г. Москва), научный консультант

Жежерин Александр Ростиславович, кандидат
технических наук, ФГАУО ВО
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (ГУАП)
(г. Санкт-Петербург), доцент кафедры

Ведущая организация: ОАО «Авангард» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 28 сентября 2017 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте университета: <http://www.eltech.ru/>.

Автореферат разослан 04 июля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мошников Вячеслав Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. После создания первых приборов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и изучения их специфических особенностей, стали предприниматься попытки изготовить на их основе всевозможные датчики. За три десятилетия целый ряд датчиков на ПАВ оказался в производственной линейке некоторых ведущих компаний, в том числе Honeywell, Sensor Technology, Sensor. Это были датчики температуры, давления, деформации, крутящего момента, магнитного поля. Были разработаны как проводные датчики, являющиеся окончательными компонентами сенсорных систем, так и беспроводные датчики, позволяющие создавать беспроводные сенсорные сети. Проблемы создания беспроводных физических датчиков на ПАВ широко освещены в работах С. S. Hartmann, Ю. В. Гуляева, В. Ф. Дмитриева, С. А. Жгуна, В. П. Плесского, А. С. Багдасаряна, D. Malocha и других. Вопросы построения химических датчиков проработаны в литературе менее подробно. Был предпринят ряд попыток создать и химические датчики на основе ПАВ-устройств. Они увенчались лишь частичным успехом. Представлено несколько типов коммерческих проводных химических датчиков на основе ПАВ-компонентов, использующих сорбционные явления в тонких пленках. Значительно больше химических датчиков на ПАВ с использованием как физической, так и химической адсорбции было создано в ходе лабораторных исследований. Однако создание пассивных (с наведенным питанием) беспроводных сорбционных датчиков пока не вышло за лабораторные стены.

Наиболее простым из химических датчиков и наиболее востребованным является датчик влажности. Беспроводной пассивный акустоэлектронный датчик влажности для коммерческого применения пока не представлен ни одной компанией. Это свидетельство затруднений, которые возникают при его создании. Эти затруднения заключаются в необходимости решения ряда взаимозависимых схемотехнических задач.

Разработано множество органических покрытий, которые призваны увеличить влагочувствительность датчиков на ПАВ. Некоторые исследователи применяют в разработках ПАВ-компоненты с подключением резистивных или емкостных датчиков. Такой вариант затрудняет массовое производство из-за введения в технологический процесс изготовления дополнительных операций. Прямое взаимодействие ПАВ с сорбированной на поверхности влагой не дает хорошей чувствительности и сказывается на уменьшении добротности и изменении импеданса акустоэлектронного компонента, что снижает дальность действия системы и предъявляет противоречивые требования по согласованию с антенной. Более продуктивным является нанесение селективного покрытия на поверхность акустоэлектронного устройства. Это снижает его добротность и

изменяет импеданс, но однократно, и позволяет согласовать антенное устройство на определенные значения импеданса и частоты.

Внедрение. Основные результаты диссертационной работы непосредственно использованы при выполнении ОКР в рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы, ОКР «Влажность» (государственный контракт № 9411.1006800.11.024 от 09.10.2009 г.), СЧ ОКР «Контроль-МСТ-Р» (договор № 11/80 от 28.11.2011 г.), ОКР «Нерв» (государственный контракт № 12411.1006899.11.074 от 14.05.2012 г.). Научные и практические результаты диссертационной работы использованы АО «НПП «Радар ммс» в ходе выполнения работ по ряду НИОКР на проведение исследований беспроводных пассивных датчиков и систем идентификации. Также результаты работы внедрены в учебный процесс СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Результаты работы подтверждены актами о внедрении.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование конструктивных и технологических основ создания беспроводного пассивного датчика относительной влажности воздуха с чувствительным элементом на поверхностных акустических волнах.

Для достижения поставленной цели определены и решены следующие задачи:

1. Анализ информации по тематике акустоэлектронных химических датчиков, акустоэлектронных датчиков влажности на ПАВ и беспроводных датчиков влажности.
2. Разработка, изготовление резонатора на ПАВ чувствительного элемента датчика влажности.
3. Проведение экспериментальных исследований свойств влагочувствительных пленок, нанесенных на поверхность резонатора на ПАВ.
4. Разработка согласованных антенн и проведение экспериментальных исследований макетов.
5. Экспериментальные исследования беспроводного пассивного акустоэлектронного датчика относительной влажности воздуха и температуры.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые показано, что максимальная чувствительность датчика влажности на основе резонатора на ПАВ с нанесенным слоем полимера нафион достигается при вязкоупругом механизме влагочувствительности и уменьшении толщины слоя вплоть до нарушения его сплошности.

2. Впервые показано, что в датчиках влажности на основе резонаторов на ПАВ с влагочувствительным наноразмерным слоем полимера нафион эффект перехода к ретроградной зависимости импеданса от влажности при уменьшении толщины слоя обусловлен доминированием вязкоупругого механизма влагочувствительности.

3. Впервые предложена схема беспроводного датчика, в которой каждый индивидуальный чувствительный элемент дифференциальной схемы соединен со своей отдельной антенной.

Теоретическая и практическая значимость результатов

1. Показано, что использование резонаторов на ПАВ с тонкими влагочувствительными пленками предпочтительнее с точки зрения чувствительности и согласования.

2. Разработана методика топологического согласования антенн с элементами на ПАВ.

3. Разработана методика старения влагочувствительных полимерных пленок, нанесенных на акустоэлектронные элементы.

4. Показано преимущество схемы с симметричными элементами и двумя антеннами по значениям величин амплитуды и отношения сигнал/шум возвращенного сигнала датчика.

5. Разработан беспроводной пассивный акустоэлектронный датчик относительной влажности воздуха и температуры и исследованы его характеристики.

6. Разработанный беспроводной пассивный датчик относительной влажности воздуха и температуры имеет высокие характеристики по дальности считывания и точности определения влажности воздуха.

7. Основные теоретические и практические результаты разработки акустоэлектронного чувствительного элемента и антенн могут использоваться в других химических и физических датчиках на ПАВ.

Методы исследования. При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы: экспериментального исследования, математического моделирования, полного электромагнитного моделирования, статистической обработки результатов измерений, аппроксимации эмпирических зависимостей, математического анализа и оптимизации.

Объект исследования – беспроводной датчик относительной влажности воздуха и температуры с чувствительными элементами на ПАВ.

Предмет исследования – оптимизация метрологических характеристик беспроводных датчиков влажности с наведенным электрическим питанием, использующих чувствительный элемент сорбционного типа на поверхностных акустических волнах, путем разработки полуколичественных эмпирических и компьютерных моделей, позволяющих исследовать и прогнозировать их основные характеристики, а также путем выработки новых конструктивных решений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Максимальная чувствительность датчика влажности на основе резонатора на ПАВ с нанесенным слоем полимера нафион достигается при вязкоупругом механизме влажочувствительности и уменьшении толщины слоя вплоть до нарушения его сплошности.

2. В датчиках влажности на основе резонаторов на ПАВ с влажочувствительным наноразмерным слоем полимера нафион эффект перехода к ретроградной зависимости импеданса от влажности при уменьшении толщины слоя обусловлен доминированием вязкоупругого механизма влажочувствительности.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается использованием оригинальных данных, полученных апробированными экспериментальными методами, и сопоставлением их с известными экспериментальными данными.

Для полного электромагнитного моделирования использовалось специализированное программное обеспечение, подкрепленное апробированными теоретическим методами исследований физических моделей.

Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования результаты не противоречат ранее полученным данным, описанным в литературе другими авторами.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

На всероссийских конференциях: Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (СПб, 2013).

На международных конференциях: международная конференция «IEEE International Ultrasonic Symposium» (Чикаго, США, 2014); международная конференция «European Microwave Conference» (Париж, Франция, 2015).

На внутривузовских конференциях: 68-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПб, 2015); 70-я научно-техническая конференция

профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПб, 2017).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в **8** научных работах, среди которых **2** статьи – в изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, **2** статьи в международных научно-технических журналах, индексированных в Scopus и Web of Science, **1** статья в российском научно-техническом журнале, **1** доклад в сборниках всероссийских научно-технических конференций, **2** доклада в сборниках международных научно-технической конференций.

Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Автором выполнены основные расчеты, проведено полное электромагнитное моделирование антенного устройства, построение качественных и полуколичественных моделей. Автор лично проводил экспериментальные исследования изготовленных образцов чувствительных элементов, антенн и беспроводного датчика. Автором предложены методика старения влагочувствительной пленки, нанесенной на поверхность резонатора на ПАВ, и методика топологического согласования ПАВ-компонентов с антеннами.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, включающего 92 наименования. Работа выполнена на 128 страницах и содержит 39 рисунков, 6 таблиц, 1 приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, приведены положения, раскрывающие новизну и практическую значимость диссертации. Представлено краткое содержание работы по главам.

В первой главе приведен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены результаты исследований за последние десятилетия и современное состояние работ в области акустоэлектронных датчиков влажности, и, в частности, беспроводных датчиков влажности на ПАВ. Рассмотрены отдельные конструкции и основные принципы разработки как проводных, так и беспроводных пассивных датчиков влажности. Рассмотрены основные влагочувствительные селективные пленки для датчиков влажности. Сделаны выводы, на основе которых определены задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведена методика расчета резонаторов на поверхностных акустических волнах. Расчет выполнялся по методу COM-параметров для акустических волн и верифицировался с помощью моделирования в САПР COMSOL. Оценки проводимости вблизи резонансной частоты выполнены методом эквивалентных цепей. Показана адекватность и объективность методики расчета при сравнении расчетных и измеренных параметров проводимости. В исследованиях использованы одноходовые резонаторы с центральными частотами 200 и 434 МГц. Внешний вид резонаторов показан на рисунке 1.

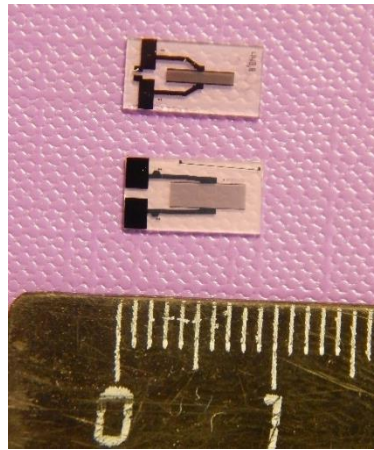


Рисунок 1 – Резонаторы 434 (сверху) и 200 (снизу) МГц

Проанализированы влагочувствительность и гистерезис нескольких влагочувствительных пленок, нанесенных на поверхность резонаторов, при различных температурах, воспроизводимость и стабильность результатов. Был исследован ряд органических и неорганических покрытий: полимер нафийон (Nafion); полибензаксазоловый полимер; силикатные пленки общего состава $nP_2O_5 \cdot SiO_2$; однослойные и многослойные углеродные нанотрубки (УНТ); полиметилметакрилат (ПММА); ПММА с УНТ; полимер нафийон с УНТ. Пленки наносились методом центрифугирования и подвергались термической обработке. По результатам исследований был выбран полимер Нафийон.

При сравнении резонаторов с тремя различными толщинами нанесенной влагочувствительной пленки полимера нафийон (50, 100 и 150 нм) показано, что чем больше толщина, тем выше смещение частоты по сравнению с начальной частотой резонатора в 434 МГц (рисунок 2). После проведения исследований, в топологию были внесены изменения для компенсации изменения частоты из-за нанесения пленки. Построение графиков изменения частоты резонанса в осях относительная влажность - частота демонстрирует, что чувствительность к влаге растет с уменьшением толщины покрытия.

Измерения характеристик проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent E5071C. Относительная влажность воздуха и температура (23 °С) прецизионно задавались с помощью генератора влажности

HygroGen 2 ф. Rotronic. Характерной особенностью всех кривых (рисунок 2) является наличие участка при относительной влажности от 5 до 25 %, на котором частота изменяется линейно с изменением относительной влажности. Характерным для всех кривых является и наличие участка при больших значениях влажности, на котором частота нелинейно, близко к параболическому закону, изменяется с изменением относительной влажности. Это объясняется теоретическими представлениями о влиянии нанесенной пленки на параметры поверхностной акустической волны, подробно описанным в [1]. Из-за наличия двух механизмов влажочувствительности, называемых массочувствительным и вязкоупругим (вязкостным), кривые влажочувствительности имеют характерный вид, представляющий собой комбинацию прямой и полиномиальной кривой [2].

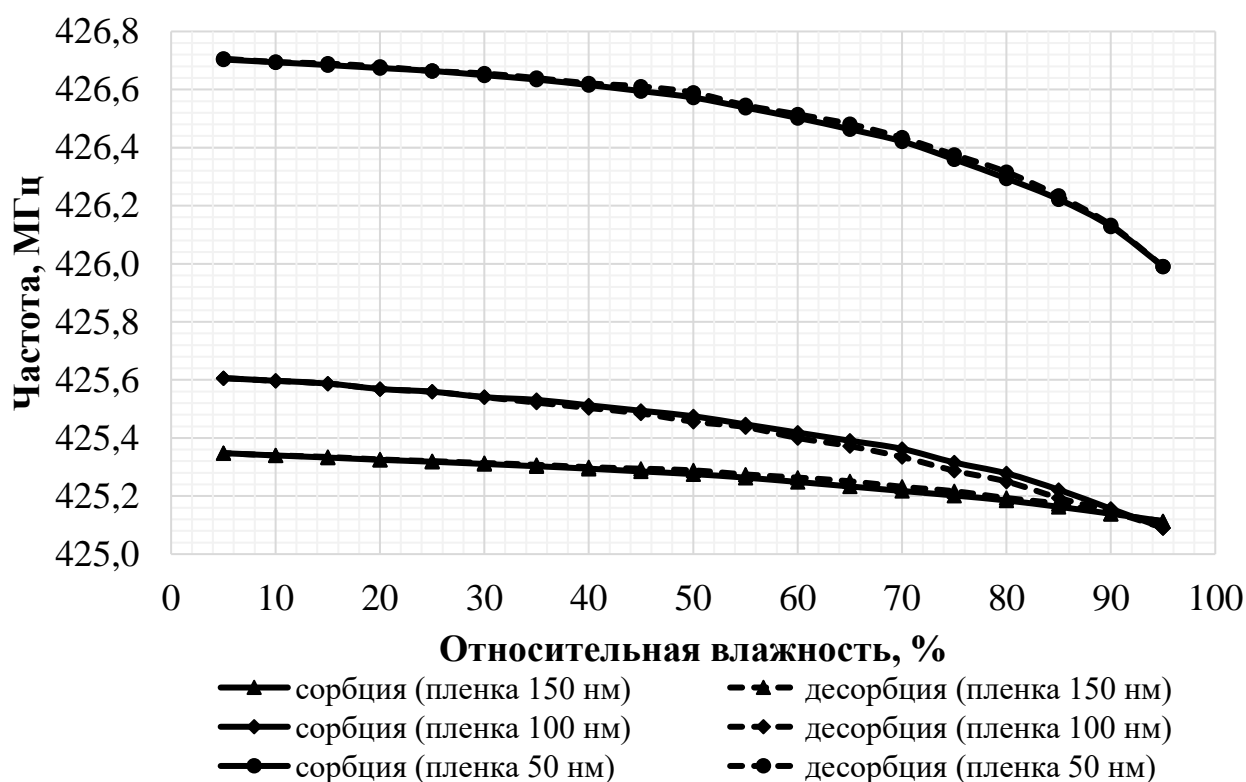


Рисунок 2 – Зависимости частоты от относительной влажности воздуха для различных толщин нанесенной пленки

При малых значениях относительной влажности влажочувствительность и характер зависимости частоты от относительной влажности будет определяться приращением массы пленки за счет присоединяемой влаги. При этом влияние сорбируемой пленкой влаги на упругие свойства пленки будет незначительным.

При больших значениях относительной влажности воздуха упругие свойства пленки будут значительно меняться. Это будет приводить к сильному нелинейному изменению скорости ПАВ. Хотя масса присоединяемой влаги

также будет оказывать влияние на скорость, но преобладающим окажется именно изменение упругих свойств [3].

При уменьшении толщины влагочувствительной пленки заметное и значительное изменение упругих свойств будет наступать и при меньших значениях относительной влажности воздуха. Предполагаем, что это и способствует увеличению влагочувствительности резонатора при уменьшении толщины пленки. То есть, наступление преобладания вязкоупругого механизма наступает тем раньше, чем тоньше пленка.

Таким образом, показано, что с уменьшением толщины влагочувствительной пленки полимера нафийон для ПАВ-резонаторов влагочувствительность растет и максимальная чувствительность достигается при вязкоупругом механизме влагочувствительности.

После нанесения пленок на поверхность резонаторов наблюдался процесс дрейфа параметров, который нивелировался применением дополнительной технологической операции – старения. Методика старения была разработана на основе таковой для влагочувствительных резистивных и емкостных элементов, но с отличиями. Предварительно подложки и отдельные чипы с нанесенной пленкой подвергались отжигу на воздухе в течение нескольких часов при температуре 120 °С. Сам процесс старения состоял из последовательно чередующихся циклов 8 ч выдержки изделий при температуре 80 °С и влажности 95 % и такой же температуры и влажности 5 %.

Другим эффектом является существование механизма компенсации изменения импеданса резонатора при изменении относительной влажности в области высоких значений. Этот эффект проявляет себя в тонких пленках. На рисунке 3 показаны коэффициента отражения от относительной влажности для резонаторов с толщинами пленок 300 и 100 нм.

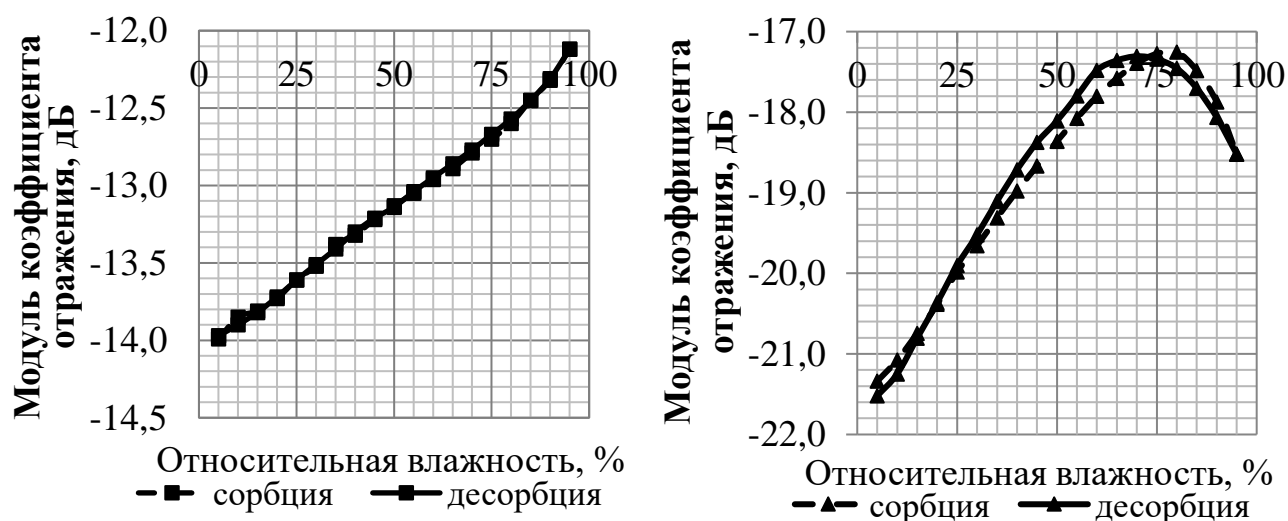


Рисунок 3 – Модуль коэффициента отражения резонаторов с толщиной нанесенной пленки 300 нм (слева) и 100 нм (справа)

В настоящих исследованиях эффект компенсации наблюдался при толщине пленок менее 150 нм. Предполагается следующее объяснение явления. При массочувствительном механизме с ростом относительной влажности воздуха происходит насыщение пленки парами воды и растет ее диэлектрическая проницаемость. Это вызывает рост статической емкости ВШП резонатора и снижение коэффициента отражения. При вязкоупругом механизме из-за взаимодействия ПАВ с насыщенной водой пленкой происходит резкое снижение КЭМС ПАВ, так как поглощенная влага влияет на упругие характеристики пленки и распространение волн по подложке. Это компенсирует увеличение статической емкости. Уравнения (1)-(3) из [4] наглядно демонстрируют взаимосвязь проводимости резонатора, статической емкости и коэффициента электромеханической связи.

$$Y_{ex}(f) = 8 \cdot k_{emc}^2 \cdot f_r \cdot C_0 \cdot N_p \cdot \left(\frac{\sin X}{X} \right)^2 +$$

$$+ j \cdot \left[8 \cdot k_{emc}^2 \cdot f_r \cdot C_0 \cdot N_p \cdot \left(\frac{\sin 2X - 2 \cdot X}{2 \cdot X^2} \right) + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0 \right] \quad (1)$$

$$X = \frac{\pi \cdot N_p \cdot (f - f_r)}{f_r} \quad (2)$$

$$k_{emc}^2 = \frac{e}{c_e \cdot \varepsilon} \quad (3)$$

В уравнениях (1)-(3) $Y_{ex}(f)$ – проводимость ВШП; f – частота; k_{emc}^2 – коэффициент электромеханической связи (КЭМС); f_r – частота резонанса; C_0 – статическая емкость ВШП; N_p – количество пар электродов ВШП; e – пьезоэлектрический коэффициент; c_e – упругие характеристики; ε – диэлектрическая проницаемость.

На основе резонаторов с нанесенной пленкой были изготовлены чувствительные элементы, представляющие собой одноходовый резонатор, помещенный в металлокерамический корпус QLCC 8/12. В крышке корпуса выполнялась перфорация для обеспечения доступа воздуха к поверхности пленки. Чувствительный элемент температуры не имеет перфорации в крышке. Внешний вид чувствительного элемента показан на рисунке 4.

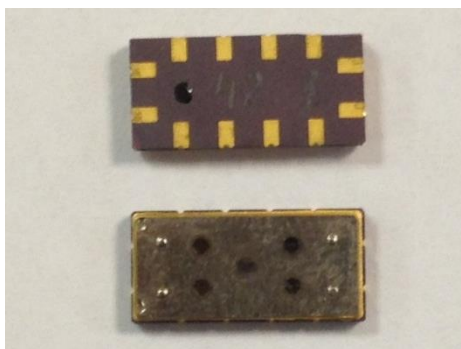


Рисунок 4 – Внешний вид чувствительного элемента датчика влажности

Таким образом, показано, что переход к ретроградной зависимости импеданса от влажности при уменьшении толщины слоя обусловлен доминированием вязкоупругого механизма влагочувствительности.

В третьей главе кратко рассмотрены существующие типы антенн для беспроводных пассивных датчиков с наведенным питанием, приведены методики согласования с импедансом чувствительного элемента. Показаны этапы проектирования антенного устройства для беспроводного датчика относительной влажности воздуха. Результаты измерений полученной структуры показаны в сравнении с результатами электромагнитного моделирования при помощи САПР.

В качестве материала для изготовления антенны был выбран фольгированный стеклотекстолит FR-4. Перед проведением полного электромагнитного моделирования был оценен размер плеча диполя по известным методикам [5].

Рассчитанная и полностью смоделированная решетка из двух идентичных прямых печатных дипольных антенн оказалась слишком большой – ее размеры 260 мм в длину и 250 мм в ширину. Это обусловлено взаимным влиянием таких протяженных структур друг на друга. Сближение приводит к деформации диаграммы направленности. Одной из целей научной работы и технической реализации, отраженных в настоящей диссертационной работе, стал поиск возможности уменьшения размеров антенны датчика.

Значительную проблему при миниатюризации антенны составляет существенное снижение активной составляющей импеданса и одновременное увеличение реактивности. Сокращая длину антенны, сокращаем путь тока, поэтому падает активная составляющая импеданса [6]. Выходом из данной ситуации является введение в топологию элементов, которые должны компенсировать сокращение размеров. Такими элементами являются Г-образные и П-образные элементы, сегменты колец, прямоугольные и круглые витки. В данном конкретном случае в топологию был введен прямоугольный виток, а в меандры с каждой стороны были добавлены дополнительные секции. Это позволило уменьшить длину антенны.

В частотной области элементы разделяет почти 5 МГц, поэтому необходимо было согласовать активную и реактивную составляющие импеданса в полосе 430-440 МГц. Суть использованной методики согласования состоит из одновременной свертки плеч диполя в меандр и компенсации возникающей емкостной реактивности с помощью увеличения индуктивности витка. Индуктивность витка увеличивалась двумя способами: увеличением периметра и уменьшением толщины полосковой линии. Таким образом, удалось согласовать реактивность чувствительного элемента. Активная составляющая импеданса составила 25-30 Ом в искомом диапазоне, что близко к 28-32 Ом у чувствительного элемента. Были сделаны три последовательных шага уменьшения линейных размеров антенны: использование одного сегмента меандра в топологии, двух и трех, соответственно. При каждом таком приближении выполнялась оптимизация параметров за счет варьирования шага и плеча меандра и соотношения размеров витка.

Топология антенного устройства показана на рисунке 5 и включает в себя две одинаковые антенны, расположенные на подложке из FR-4 с металлизацией 35 мкм длиной 232 мм и шириной 122 мм. Толщина подложки – 1 мм.



Рисунок 5 – Топология антенны датчика

Расчетная зависимость активной составляющей импеданса от частоты показана на рисунке 6, реактивная – на рисунке 7. Измеренные с помощью векторного анализатора R&S ZNB4 активная и реактивные составляющие импеданса приведены на рисунке 8.

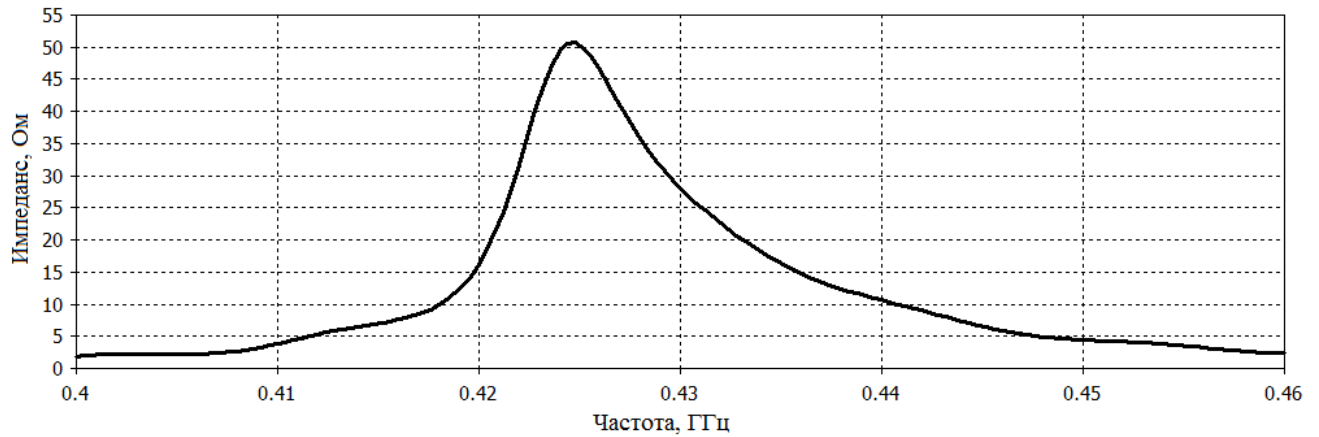


Рисунок 6 – Расчетная активная составляющая импеданса антенны

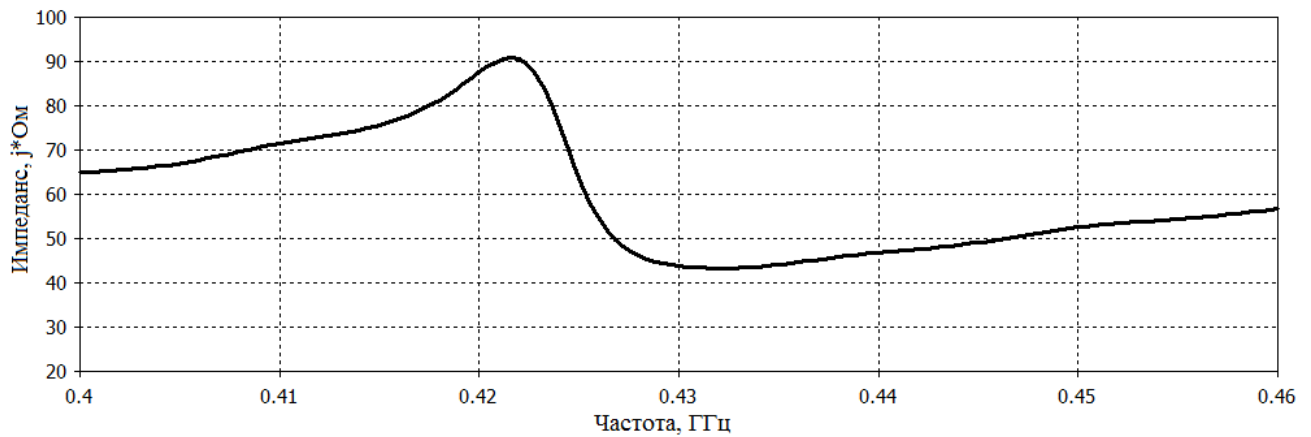


Рисунок 7 – Расчетная реактивная составляющая импеданса антенны

Антенна для датчика была изготовлена на производственной базе АО «НПП «Радар ммс» методом прямой фотолитографии. Травление осуществлялось в перекисно-солянокислом растворе.

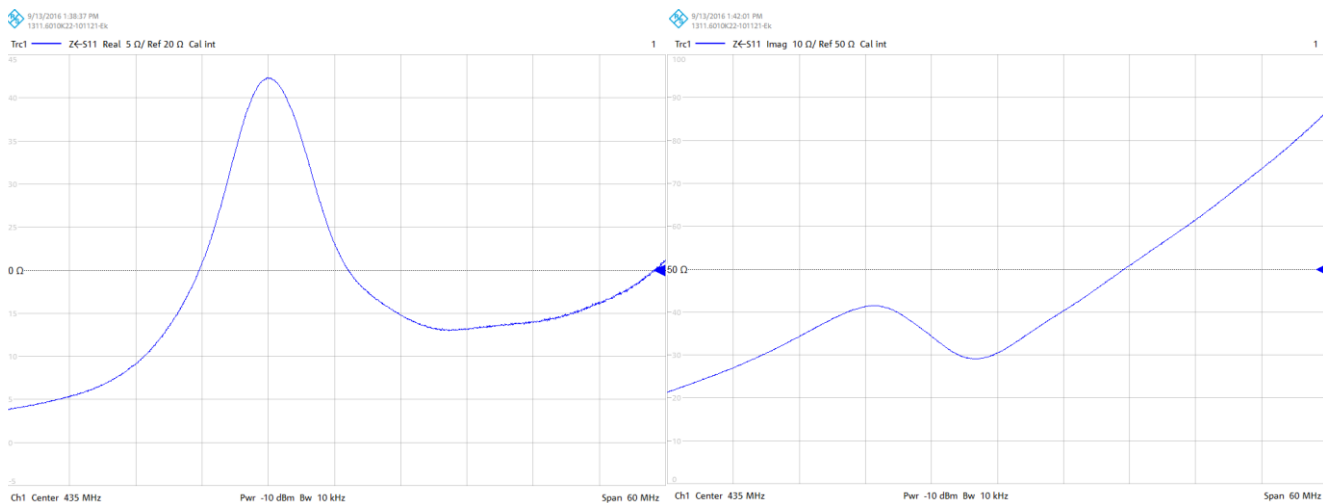


Рисунок 8 – Измеренные активная (слева) и реактивная (справа) составляющие импеданса антенны датчика

После изготовления антенного устройства к одной из антенн был припаян чувствительный элемент датчика влажности и проведено измерение формы диаграммы направленности излучения. По результатам измерений была построена диаграмма направленности. Ее сравнение с результатами моделирования в пакете CST MWS показано на рисунке 9.

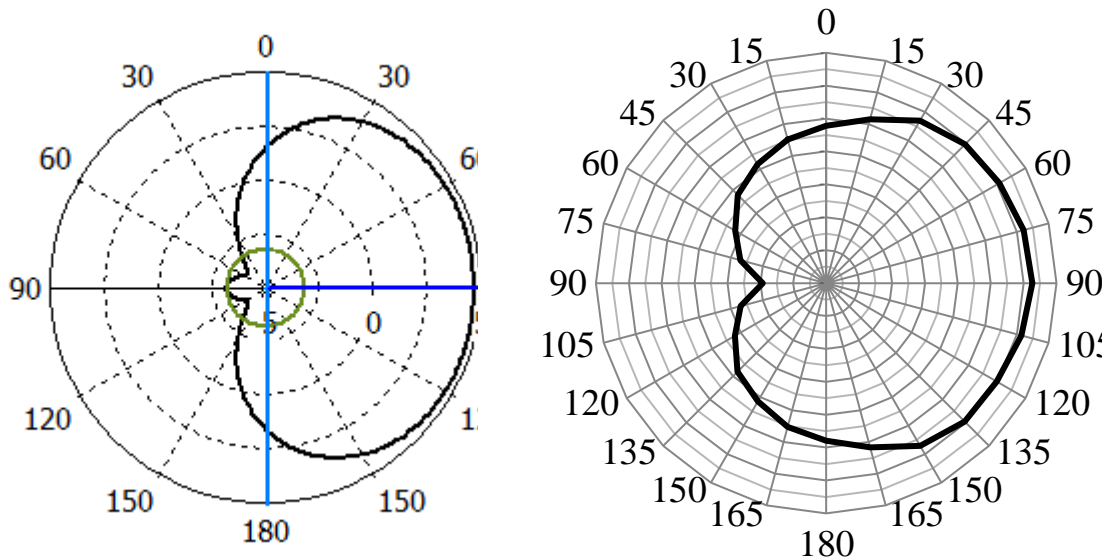


Рисунок 9 – Сравнение расчетной диаграммы направленности (слева) антенного устройства с результатами измерений (справа). Плоскость антенны перпендикулярна вертикальному направлению.

Таким образом, было разработано антенное устройство из двух антенн, диаграмма направленности каждой из которых закрывает половину пространства.

В четвертой главе настоящей работы приведены результаты исследований параметров беспроводного датчика относительной влажности воздуха и температуры. После изготовления партии чувствительных элементов и платы антенны, отобранная пара резонаторов в корпусах была смонтирована на антенное устройство методом пайки. Внешний вид изготовленного датчика показан на рисунке 10.

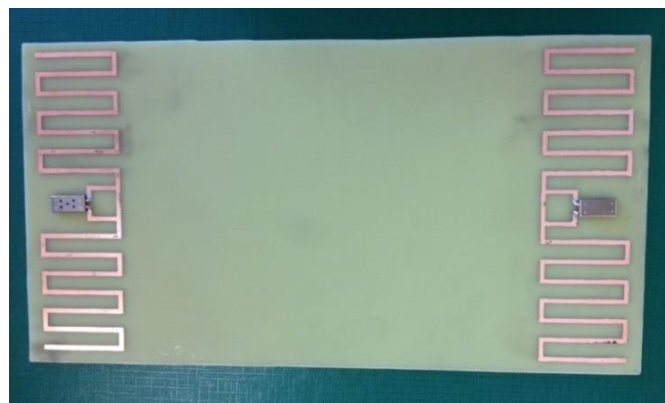


Рисунок 10 – Внешний вид датчика

Измерения дальности действия датчика влажности производились с помощью осциллографа DSO80304 и генератора N5181A ф. Agilent. Для развязки приемного и передающего трактов применялся циркулятор C-UL-50-X/2 ф. Radiall. Дальность беспроводного считывания информации с датчика при уровне импульсной мощности 2 Вт и длительной в 10 мВт составила 2,0-2,5 м в условиях лаборатории. Исследование влажочувствительности и измерение погрешностей определения влажности и температуры производилось в испытательной камере влажности-температуры-холода МНК-225СL ф. Terchu. Дверца камеры является непрозрачной для радиосигнала, поэтому на ее место устанавливалось окно из ПММА толщиной 15 мм. Через окно для ввода проб в камеру устанавливался контрольный прибор Testo-650 ф. Testo. С помощью камеры задавались значения относительной влажности и температуры, а приемопередающим устройством производилось считывание показаний датчика. По результатам исследований датчик продемонстрировал погрешности определения температуры и относительной влажности воздуха $\pm 0,5$ °С и ± 2 % соответственно.

Таким образом, предложена схема беспроводного датчика с двумя симметричными чувствительными элементами для определения относительной влажности воздуха и температуры и двумя отдельными антеннами. Такая схема обеспечивает максимальные по величине значения соотношения сигнал/шум и добротности возвращенного сигнала датчика. Разработанный датчик не уступает по основным характеристика наиболее близкому функциональному аналогу на основе ИС, а по точности определения относительной влажности воздуха – превосходит его.

Результаты разработки акустоэлектронного чувствительного элемента и антенн могут использоваться в других сорбционных датчиках на ПАВ.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационном исследовании.

Основные результаты и выводы:

1. В результате выполнения работы были разработаны чувствительные элементы на основе одноходовых ПАВ резонаторов и согласованные с ними антенны в составе антенного устройства датчика.

2. При создании химических датчиков на ПАВ компонентах следует выбирать более тонкие селективные покрытия для обеспечения большей целевой чувствительности, снижения вносимого пленкой затухания акустических волн и компенсации рассогласования импеданса.

3. Максимальная чувствительность датчика влажности на основе ПАВ резонатора с нанесенным слоем полимера нафийон достигается при вязкоупругом механизме влажочувствительности и уменьшении толщины слоя вплоть до нарушения его сплошности.

4. В датчиках влажности на основе ПАВ резонаторов с влагочувствительным наноразмерным слоем полимера нафийон эффект перехода к ретроградной зависимости импеданса от влажности при уменьшении толщины слоя обусловлен доминированием вязкоупругого механизма влагочувствительности.

5. Разработана методика старения влагочувствительных полимерных пленок, нанесенных на акустоэлектронные элементы.

6. Разработана методика топологического согласования антенн с ПАВ элементами.

7. Использование в беспроводном датчике относительной влажности воздуха антенного устройства с двумя антеннами, каждая из которых нагружена только одним из резонаторов, обеспечивает максимальные значения амплитуды и отношения сигнал/шум возвращенного сигнала датчика.

8. Разработан беспроводной пассивный акустоэлектронный датчик относительной влажности воздуха и температуры и исследованы его характеристики.

9. Разработанный датчик относительной влажности воздуха и температуры на основе ПАВ технологии не уступает датчику на основе ИС с резистивным чувствительным элементом, а по точности определения относительной влажности и уровню чувствительности – превосходит его.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Деркач М. М. Проектирование резонансных чувствительных элементов на ПАВ для использования в датчиках физических величин / Деркач М. М., Кириллов Н. Г. // Радиопромышленность. – 2012. – Вып. 4. – С. 151-156.

2. Новиков В. В. Акустоэлектронные изделия, герметизированные методом флип-чип / Новиков В. В., Деркач М. М., Кириллов Н. Г. // Радиопромышленность. – 2012. – Вып. 4. – С. 163-168.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

3. SAW temperature sensor on quartz / Zhgoon S. [et al.] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2015. – Vol. 62, is. 6. – P. 1066-1075.

4. Electrically Small Loop Antennas for RFID Applications / Turalchuk P. [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2015. – Vol. 14. – P. 1786-1789.

Публикации в других изданиях

5. Деркач М. М. Исследование датчика относительной влажности воздуха, основанного на поверхностных акустических волнах / Деркач М. М., Корляков А. В. // Биотехносфера. – 2016. – № 5 (47). – С. 23-26.

6. Деркач М. М. СВЧ антенна ближнего поля для систем радиочастотной идентификации объектов на основе пассивных элементов на ПАВ / Деркач М. М., Туральчук П. А., Мунина И. В. // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2013. – С. 4.

7. Choice of quartz cut for sensitive wireless SAW temperature sensor / Shvetsov A. [et al.] // IEEE INTERNATIONAL ULTRASONICS SYMPOSIUM (IUS). – 2014. – № 1. – P. 1505-1508.

8. Propagation of electromagnetic waves radiated by an implanted antenna / Turalchuk P. [et al.] // European Microwave Conference (EuMC). – 2015. – P. 387-390.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малов Б. В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.

2. Wireless surface acoustic wave chemical sensor for simultaneous measurement of CO₂ and humidity / Wen Wang [et al.] // J. Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS. – 2009. – Vol. 8(3), 031306.

3. Liu J. Dynamics and response of a humidity sensor based on a Love wave device incorporating a polymeric layer / Liu J., Wang L. // Sensors and Actuators B. – 2014. – Vol. 204. – P. 50–56.

4. Janeliauskas A. Design and modeling of surface acoustic wave sensor with staggered ID – tag // ULTRAGARSAS (ULTRASOUND). – 2010. – Vol. 65, №2. – P. 24-29.

5. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. Third edition. – John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 1074 p.

6. Marrocco G. The art of UHF RFID antenna design: impedance-matching and size-reduction techniques // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2008. – Vol. 50, № 1. – P. 66-79.