

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Груздева Александра Сергеевича** «Методы проектирования высокоизбирательных микроблоков на основе фильтров на поверхностных акустических волнах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

За последние годы частотно-избирательные и часто-задающие устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ): фильтры, резонаторы и генераторы, стали одними из ключевых компонентов современной радиоаппаратуры благодаря своим малым габаритам, стабильности и надежности. Но из-за постоянного расширения функций радиоаппаратуры для систем связи, радиолокации, навигации и т.д. при одновременном расширении ее динамического диапазона, росте скорости передачи сложных сигналов, увеличении плотности распределения информационных каналов и их помехозащищенности, непрерывно ужесточаются требования к основным параметрам фильтров: вносимым потерям, ширине полосы пропускания, избирательности, к точности неискаженной передачи сигналов. Если вчера достигнутые параметры фильтров считались предельно возможными, то сегодня они являются обыденными, а на завтра выдвигаются еще более жесткие требования. При этом время универсальных конструкций прошло и чтобы удовлетворить современным требованиям для каждого вида применений фильтров на ПАВ необходимо проводить комплексные исследования с привлечением новых схемотехнических, конструкционных, технологических решений и более точных методов измерений их параметров.

Поэтому диссертация Груздева А.С., посвященная выбору оптимальных конструкций и методов проектирования фильтров на ПАВ для разных частотных диапазонов и полос пропускания, проведению экспериментальных исследований по разработке и изготовлению частотно-избирательных микроблоков на основе фильтров на ПАВ, разработке методов проектирования контактных устройств (КУ), обеспечивающих высокую точность измерения параметров образцов с минимальными искажениями, является несомненно **актуальной** и ее результаты будут иметь практическое применение в различных отраслях народного хозяйства.

Диссертационная работа Груздева А.С. состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении кратко сформулированы актуальность, цели, задачи и методы исследований, отмечена научная новизна работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отражен личный вклад соискателя, обоснована достоверность результатов, указана апробация работы.

Глава 1 диссертационной работы посвящена конструктивно-технологическим особенностям создания частотно-избирательных микроблоков (ЧИМ) специального назначения на основе фильтров на ПАВ.

Обоснована оптимальная структурная схема построения ЧИМ, включающая два фильтра на ПАВ с «распределёнными» параметрами и один малошумящий усилитель, расположенный между ними. Кратко описаны математические модели, используемые в дальнейшем при моделировании фильтров на ПАВ. Обосновано

использование в ЧИМ бескорпусного широкополосного малошумящего СВЧ-усилителя 1324УВ6Н4 производства АО «НПП «Пульсар», применение которого обеспечило по результатам испытаний высокую радиационную стойкость микроблока в целом. Разработанные модификации оригинальных программ Ladder_yc и SAW_yc позволили обеспечить точность моделирования характеристик высокоизбирательных ЧИМ на основе фильтров на ПАВ с учетом влияния характеристик усилителя на выходные характеристики микроблока. В качестве корпусов ЧИМ выбраны отечественные серийные металлокерамические корпуса для поверхностного монтажа. Таким образом, предложенные базовые конструкции ЧИМ реализованы с максимальным использованием компонентной базы российского производства.

Глава 2 посвящена особенностям проектирования непосредственно фильтров на ПАВ в качестве частотно-избирательных элементов (ЧИМ).

В главе кратко изложены физико-технические принципы построения основных типов фильтров на ПАВ. На основе анализа различных вариантов исполнения осуществлен выбор базовых конструкций фильтров на ПАВ, обеспечивающих малое вносимое затухание и, следовательно, малый коэффициент шума ЧИМ в исследуемом диапазоне частот от 157 МГц до 1330 МГц.

Учитывая, что значительный вклад в уровень вносимого затухания вносят потери на распространение акустической волны, в диссертационной работе были проведены исследования по минимизации данного параметра для различных кристаллографических ориентаций ниобата лития, исследовано влияние толщины напыляемой пленки алюминия на величину потерь на распространение волны, а также на эффективный коэффициент электромеханической связи.

Также, с моей точки зрения, большой интерес для развития современной акустоэлектроники имеют результаты исследований новых перспективных срезов ниобата лития ориентаций $YXl/15^\circ$ и $YXl/19^\circ$, обладающих максимальным на сегодняшний день эффективным коэффициентом электромеханической связи, позволяющим обеспечить расширение достижимой полосы пропускания фильтров.

Особое внимание уделено автором вопросу минимизации искажений характеристик фильтров на ПАВ, обусловленных наличием паразитных элементов конструкции. С этой целью были проведены совместные с АО «ЗПП» исследования по доработке металлокерамических корпусов для поверхностного монтажа типа SMD 14,0x8,2x2,6 мм и SMD 9,1x7,1x2,0 мм, используемых для монтажа ЧИМ. В результате данных исследований была существенно уменьшена емкость выводов корпуса на землю, а также за счет улучшения качества золотого покрытия и оптимизации внутренних соединений в корпусе были уменьшены величины паразитные сопротивления и индуктивности, корпусов.

В **главе 3** представлены результаты исследований и испытаний ряда частотно-избирательных микроблоков на основе фильтров на ПАВ на частотный диапазон 150-1500 МГц, разработанных и изготовленных на основе предложенных А.С. Груздевым базовых конструкций фильтров и рекомендаций по модернизации технологического процесса их изготовления, учитывающих в том числе особенности изготовления ЧИМ на основе фильтров на ПАВ. Это позволило реализовать ряд ЧИМ на частоты 157-1330 МГц с избирательностью 40-62 дБ и коэффициентом шума 5,1-6,9 дБ в зависимости от рабочего диапазона частот.

Проведенные исследования подтвердили высокую стойкость ЧИМ к воздействию различных видов механических, климатических и специальных факторов, а также высокую надежность ЧИМ, особенно ЧИМ с использованием в фильтрах пьезоэлектрических материалов с повышенной проводимостью, обладающих низким уровнем пирозффекта.

В главе 4 описываются методы проектирования прецизионных контактных устройств, обеспечивающих высокую точность измерения параметров акустоэлектронных радиокомпонентов в диапазоне частот до 2,5 ГГц. В главе проведен сравнительный анализ различных типов конструкций прецизионных контактных устройств (КУ), а также приведены результаты измерений конкретных фильтров и микроблоков с использованием КУ, разработанных автором. Приведены рекомендации по применению КУ в зависимости от типа корпуса устройства на ПАВ и рабочего частотного диапазона. Разработанные методы проектирования обеспечили минимальное влияние КУ на измеряемые параметры фильтров как в полосе пропускания, так и в широкой полосе заграждения. Так, во всем диапазоне частот, используемом в технике ПАВ (от 20 до 3500 МГц), базовые конструкции КУ имеют коэффициент стоячей волны по напряжению не более 1,25 и уровень электромагнитной развязки более 80 дБ.

На мой взгляд, диссертация Груздева А.С. содержит ряд **новых научных результатов**, имеющих и высокую практическую ценность. К ним относятся следующие:

1. Установлено, что оптимальным конструктивным решением ЧИМ с точки зрения обеспечения жестких требований к совокупности их параметров является использование двух распределенных фильтров на входе и выходе ЧИМ, что обеспечивает высокую избирательность микроблока, малый коэффициент шума, снижение уровня интермодуляционных искажений и высокую помехозащищенность.

2. На основании исследований срезов ниобата лития, поддерживающих распространение приповерхностных волн, как наиболее часто используемых ориентаций ($YXl/41^\circ$, $YXl/49^\circ$, $YXl/64^\circ$), так и перспективных ($YXl/15^\circ$ и $YXl/19^\circ$), определен диапазон оптимальных толщин пленки электродов из алюминия 4-6%, обеспечивающий минимальный уровень вносимого затухания устройств на ПАВ при одновременном увеличении коэффициента электромеханической связи (до 20% в зависимости от типа среза). Это позволяет расширить полосу пропускания и уменьшить вносимое затухание фильтров, что, в свою очередь, позволяет снизить коэффициент шума ЧИМ. Разработанный же высокоэффективный метод подавления паразитной составляющей излучения в виде чисто поверхностной рэлеевской волны в перечисленных выше срезах за счет нанесения дополнительной пленки SiO_2 малой толщины (не более 0,1 мкм) позволил увеличить избирательность фильтров и ЧИМ в широкой полосе частот.

3. Предложенная автором модификация оригинальных программ Ladder_vc и SAW_vc, позволила учитывать при расчете ЧИМ не только акустические и электромагнитные эффекты, присущие любым акустическим компонентам, но и влияние характеристик малошумящего усилителя на выходные характеристики ЧИМ, в т. ч. собственную АЧХ усилителя, его комплексные

импедансы, а также изменение частоты микроблока в процессе выхода на рабочий режим из-за нагрева МШУ.

4. Разработаны методы проектирования так называемых «нейтральных» контактных устройств (КУ), которые обеспечивают минимальное влияние на измеряемые параметры фильтров как в полосе пропускания, так и в широкой полосе заграждения. В рабочем частотном диапазоне от 20 до 2500 МГц базовые конструкции КУ обеспечивают КСВн не более 1,25, уровень электромагнитной развязки более 80 дБ между входом и выходом фильтров. Это позволило значительно улучшить точность измерения частотных характеристик фильтров и получить достоверные данные для дальнейшего усовершенствования их конструкций.

Достоверность разработанных моделей и методов моделирования подтверждается высокой степенью совпадения расчетных и экспериментальных характеристик, а также результатами испытаний более чем 180 типов фильтров и ЧИМ, освоенных в производстве и поставляемых широкому кругу заказчиков.

Практическая значимость диссертации подтверждена внедрением ее результатов на предприятии ООО «БУТИС». Москва, с достижением экономического эффекта более 1 млн. рублей за период 2016 – 2021 г. г.

Вместе с тем диссертация Груздева А.С. не лишена **недостатков**. К ним следует отнести:

1. В работе излишне подробно описаны известные принципы работы преобразователей ПАВ и фильтров на ПАВ. Достаточно было бы дать ссылки на книги, уже опубликованные с 1975 г. по 2012 г.

2. Также излишне подробно описаны методики и результаты испытаний частотно-избирательных микроблоков, обычно приводимые в технических условиях на изделие и в протоколах.

3. Отсутствует сравнение характеристик выбранного МШУ 1324УВ6Н4 с характеристиками других аналогов.

4. Отсутствует какое-либо сравнение собственных полученных результатов с результатами других специалистов как российских, так и зарубежных. Поэтому некоторые выводы об оптимальности выбранных решений носят декларативный характер.

5. Не корректно используется сравнение характеристик разработанных автором СВЧ контактных устройств с характеристиками других контактных устройств для контроля микросхем по постоянному току.

6. В ряде мест диссертации следует указать на путаницу в терминологии: динамический диапазон и коэффициент шума, избирательность и динамический диапазон, стойкость и надежность изделия и т.д.

7. Рисунки 2.22, 2.32, 2.28, отображающие электродные структуры фильтров, выполнены настолько в малом масштабе, а рисунки 3.5, 3.7, 3.8, 3.9, 3.13, 3.15, 3.17, 3.18, иллюстрирующие базовые конструкции ЧИМ, наоборот, настолько упрощены и не соответствуют реальным топологиям электродных структур фильтров и их контактных площадок, что не позволяют идентифицировать тип этих структур и подтвердить работоспособность ЧИМ.

8. При оформлении графиков использован мелкий шрифт, что затрудняет анализ представленного иллюстративного материала.

Высказанные замечания, безусловно, не влияют на положительную оценку диссертационной работы А.С Груздева, которая является логически завершенным теоретическим и экспериментальным исследованием проблемы, обладающей актуальностью, а также большой научной и практической значимостью. Представленные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в современных системах приема, передачи и обработки информации, работающих в диапазоне частот до 1,5 ГГц.

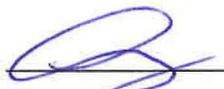
Диссертационная работа Груздева А. С. «Методы проектирования высокоизбирательных микроблоков на основе фильтров на поверхностных акустических волнах» выполнена на высоком научном уровне, в полной мере отвечает паспорту специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» и соответствует всем требованиям п.п.9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автор диссертационной работы – Груздев Александр Сергеевич – **заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук** по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник научно-исследовательской части МТУСИ, доктор технических наук по специальности 05.27.04 «Пассивные радиоэлектронные компоненты», старший научный сотрудник по специальности 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

« 25 » 09 2022 г.

 В.С. Орлов

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

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

Ученый секретарь Ученого совета МТУСИ

« 26 » апреля 2022 г.



 Т.В. Зотова

Сведения об организации:

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