



**С промышленностью
на одной волне**

**Итоги научно-исследовательской работы Института
радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН
в 2022 году**

И.о. директора ИРФЭ ОНЦ СО РАН к.ф.-м.н., доцент **Кривальцевич Сергей Викторович**

И.о. заместитель директора ИРФЭ ОНЦ СО РАН д.ф.-м.н., профессор **Струнин Владимир Иванович**

Исследование в области радиофизики и радиотехники

- Проведение исследований и разработок в области систем связи, навигации, локации и мониторинга, и доведение их до технологических решений.
- Математическое моделирование процессов распространения радиоволн в системах связи различного назначения
- Экспериментальные исследования ионосферы Земли методами пассивного транссионосферного и наклонного зондирования
- Исследование влияния подстилающей поверхности на работу излучающих радиосистем
- Самоорганизация радиосетей и когнитивных систем радиосвязи
- Разработка методов повышения технических характеристик аппаратуры радиосвязи

Исследование в области физической и функциональной электроники

- Математическое моделирование процессов переноса частиц в газоразрядной плазме низкого давления на основе статистического подхода. Динамика слабоионизованной плазмы низкого давления в скрещенных электрическом и магнитном полях
- Разработка модели кинетики процессов, протекающих в газовой фазе
- Экспериментальные исследования процессов формирования пленок AlN методом реактивного магнетронного распыления мишени в реактивной среде
- Разработка модели и конструкции брэгговского отражателя на основе слоев алюминия и молибдена для пьезоэлектрических структур на основе нитрида алюминия
- Разработка комплексной модели резонатора и фильтра на поверхностных поперечных акустических волнах (STW)

Научно-технический совет

Директор

Заместитель директора

Лаборатория
когнитивных систем
связи, навигации,
локации и мониторинга

*зав. лаб.
Кривальцевич С.В.*

Лаборатория
функциональной
электроники

*и.о. зав. лаб.,
Струнин В.И.*

Лаборатория
радиофизического
материаловедения и
излучающих систем

*и.о. зав. лаб.,
Яценко А.С.*

Лаборатория
специальных
радиофизических
измерений
(совместная с АО «ОНИИП»)

*и.о. зав. лаб.,
Косарев Б.А.*

В Институте на 1 февраля 2023 года работает 45 сотрудников, в том числе: 32 научных сотрудника, 12 инженеров, 1 техник. Из них имеют ученую степень доктора наук 3 чел., кандидатов наук – 17 чел.

Молодыми учёными и специалистами являются 27 сотрудников. Средний возраст сотрудников 38 лет.

- Повышение эффективности инфокоммуникационных систем в условиях арктической зоны РФ (2019-2021, руководитель, к.ф.-м.н. Кривальцевич С.В.)
- Фундаментальные основы построения нано- и микросистем радиотехнических устройств селекции и генерации сигналов СВЧ-диапазона на основе тонкопленочных пьезоэлектрических структур, формируемых плазмохимическими и ионно-плазменными методами (2021-2023, руководитель, д.ф.-м.н. Струнин В.И.)
- Исследование способов применения информационно-вычислительных ресурсов для интеллектуального управления телекоммуникационными системами на базе когнитивных радиосетей (2022-2024, руководитель, к.ф.-м.н. Кривальцевич С.В.)

Публикации:

В 2018-2023 году сотрудниками ИРФЭ опубликовано 101 научная статья, 123 доклада, поданы 2 заявки на РИД. (Опубликовано: 2018 – 1 статья; 2019 год – 12 статей, 16 докладов; 2020 год – 29 статей, 23 доклада; 2021 год – 26 статей, 40 докладов; 2022 год – 30 статей, 44 доклада, 2023 год – 3 статьи)

Публичное освещение результатов работы:

Институтом радиофизики и физической электроники учреждена и при поддержке АО «ОНИИП», ОмГУ и ОмГПУ проведена в 2020 и 2022 году Российская научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества». Изданы сборники докладов, включающие более 120 докладов каждый. Результаты исследований регулярно докладываются на Омском научном семинаре «Современные проблемы радиофизики и радиотехники»

Планы развития:

Подготовлены по результатам исследований и поданы совместно с АО ОНИИП и ОмГУ 7 тематических карточек в различные программы (РАН, Минпром РФ, Минобороны РФ) на выполнение прокладных НИР и ОКР. Поданы 3 заявки на гранты РФ.

В краткосрочной перспективе (2023-2025 гг.) планируется как развитие существующих, так создание 2-х новых лабораторий для развития исследований в области радиофитоники и искусственного интеллекта, увеличение численности коллектива до 70-90 сотрудников, а также получение статуса обособленного подразделения в составе ОНЦ СО РАН.

Среди основных вопросов, которые сдерживают развитие Института в среднесрочной перспективе 3-5 лет являются:

- **Высокие накладные расходы ОНЦ СО РАН, до 80-100%**

Предлагаемое решение: поддержать открытие 3 проекта Института радиофизики и физической электроники «», рекомендовать руководству ОНЦ увеличить количество проектов госзаданий, финансируемых Минобрнауки, провести оптимизацию структуры ОНЦ СО РАН.

- **Слабая приборная база Института радиофизики и физической электроники**

Предлагаемое решение: добиться возможности участия в конкурсах РАН по оснащению приборами, развитие сотрудничества с предприятиями. Учреждениями СО РАН и вузами из Омской, Новосибирской и Томской областей)

- **Ликвидация набора в бакалавриат по направлению «радиофизика» в ОмГУ им. Ф.М. Достоевского с 2023 года.**

В 2019-2022 году в ИРФЭ трудоустроены 20 выпускников данного направления, в основном молодежь. Предлагаемое решение – обратиться к руководству ОмГУ с предложением возобновить набор с 2024 года



С промышленностью на одной волне

Результаты проведенных исследований в 2022г.

Рег. № НИОКТР 122011200349-3

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Исследование способов применения информационно-вычислительных ресурсов
для интеллектуального управления телекоммуникационными системами
на базе когнитивных радиосетей
(промежуточный, 1 этап)**

Омск-2022

Исследование способов применения информационно-вычислительных ресурсов для интеллектуального управления телекоммуникационными системами на базе когнитивных радиосетей (ГЗ 2022-2025)

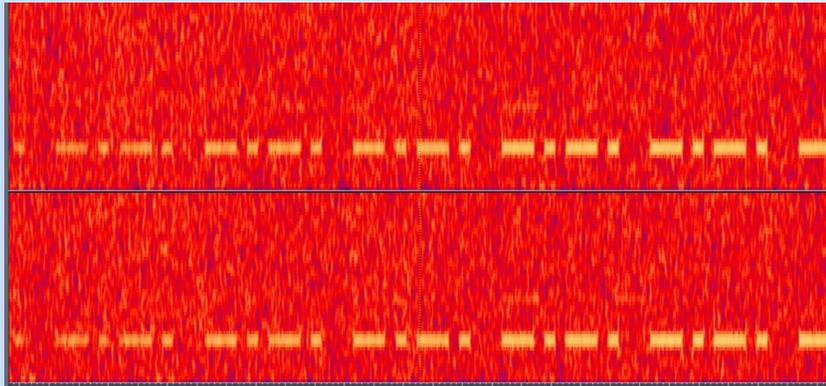
- Целью дальнейших исследований является анализ способов применения информационно-вычислительных ресурсов для интеллектуального управления телекоммуникационными системами на базе когнитивных радиосетей. При этом под когнитивными радиосетями понимаются радиосети, способные автоматически решать задачи оперативного контроля за текущей загрузкой радиочастотного диапазона, проводить зондирование (активными и пассивными способами) радиоканалов с целью автоматического выбора оптимальных способов передачи информации в них, адаптироваться к изменениям условий распространения радиоволн в ходе информационного обмена.

1. Совершенствование уже созданных и создание новых экспериментальных установок для проведения радиофизических исследований атмосферы и поверхности Земли;
2. Исследование новых алгоритмов диагностики сред распространения радиоволн;
3. Совершенствование известных способов адаптации алгоритмов и программ для прогнозирования параметров радиоканалов;
4. Разработка методов автоматического регулирования параметров работы технических средств радиосвязи на основе знаний о физических влияющих на условия их работы;
5. Решение комплекса задач по разработке методов интеллектуального управления системами и сетями радиосвязи.
6. Проведение исследований спектров комплексной диэлектрической проницаемости нескольких образцов с разным содержанием физической глины, создание физически обоснованной модели КДП.
7. Оценка диэлектрических характеристик подстилающей поверхности в КВ диапазоне радиоволн по спутниковым данным, полученным в СВЧ диапазоне волн.
8. Анализ общих вопросов разработки и создания микроэлектронных резонаторов на ОАВ и путей реализации полосовых фильтров на их основе;
9. Разработка новых структур для нано- и микросистем, используемых в радиотехнических системах связи;

1.1 Метод определения ионосферного индекса для адаптации программ расчета характеристик коротковолновых радиолиний к реальной обстановке



Авторы: Зачатейский Д.Е., Зубков М.П.



Результаты регистрации радиосигнала

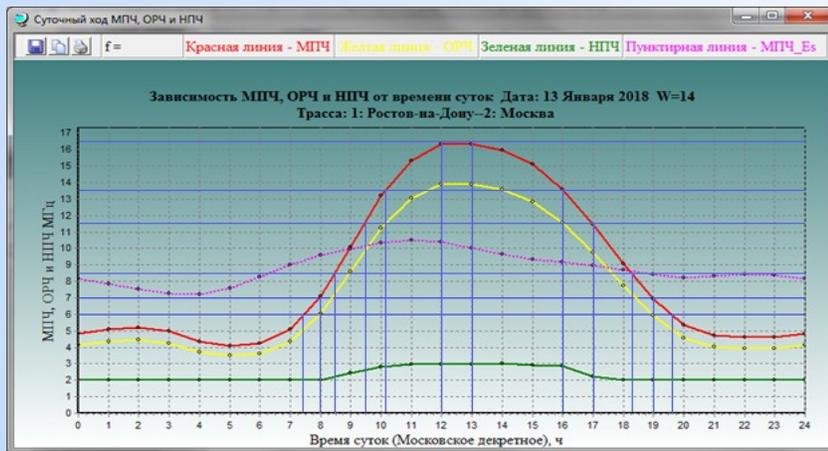


Иллюстрация методики измерения параметров ионосферы

В 2022 г в ИРФЭ ОНЦ СО РАН велись работы по многоканальному приему сигналов радиомаяков. Пополнена база экспериментальных данных. Доработана и прошла апробацию методика определения ионосферного индекса, который может использоваться для адаптации модели ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) к реальной обстановке, использования адаптированной модели в программе прогнозирования траекторных и энергетических характеристик коротковолновых радиоканалов когнитивных радиосетей.

Проведенный сравнительный анализ значений ионосферного индекса, определенного по предлагаемой методике, и известного индекса Effective Sunspot Number, определяемого в США. Результаты анализа показали близость полученных в омском эксперименте результатов с известными данными.

Определены пути дальнейшей модернизации экспериментальной установки и методик определения нового ионосферного индекса.

1.2 Алгоритм для повышения точности восстановления значений полного электронного содержания по кодовым и фазовым задержкам сигналов глобальной навигационной спутниковой системы



Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,
Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Авторы: Сидоренко К.А., Васенина А.А., Кондратьев А.Н.

Одной из наиболее актуальных методик определения ПЭС (полное электронное содержание) является использование сигналов космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Данная методика позволяет получать оперативные данные с хорошими пространственно-временными характеристиками в зоне видимости навигационных спутников.

В основном используется методика оценки групповой и фазовой задержки сигнала в ионосфере от навигационных спутников. Проблемой при исследовании ионосферы методами ГНСС-зондирования, в частности при определении абсолютного ПЭС, являются систематические ошибки, обусловленные различным временем распространения сигнала разных частот в трактах приемного и передающего оборудования.

В данной работе описан алгоритм по восстановлению ПЭС с использованием кодовых и фазовых задержек, полученных из сигналов ГНСС.

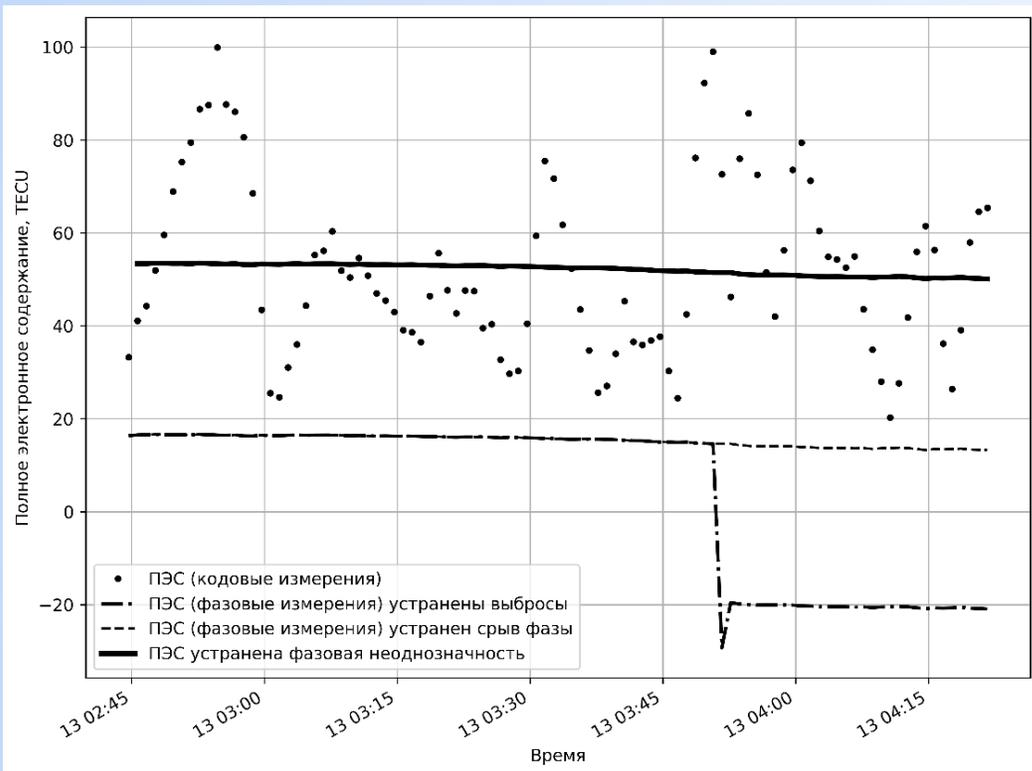


Рисунок 1 - Результат обработки кодовых и фазовых измерений и результат устранения фазовой неоднозначности

2.1 Моделирование радиосети коротковолнового диапазона

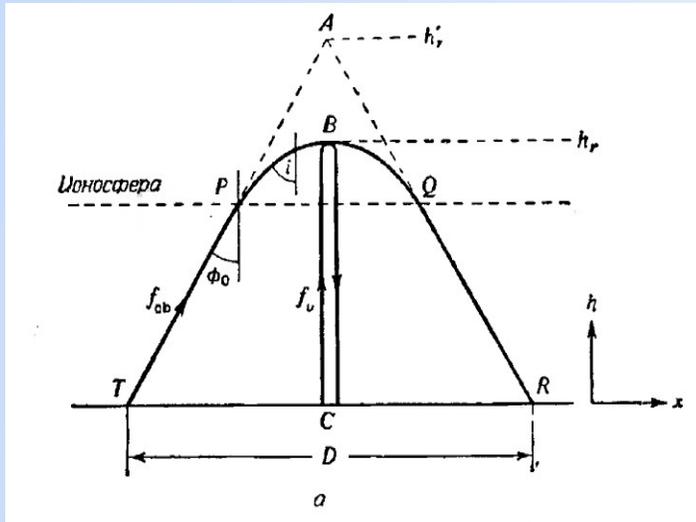


Иллюстрация теоремы эквивалентности

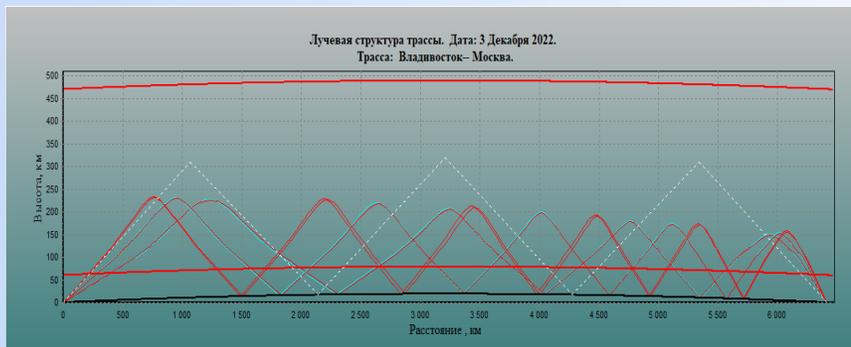
Автор: Зачатейский Д.Е.

Проведены вычислительные эксперименты, позволившие оценить различия в оценке параметров коротковолновых радиоканалов сетей радиосвязи, получаемые при использовании способов расчета, рекомендованных Международным союзом электросвязи (рекомендация ITU-R P.533) и методов, предложенных российскими исследователями.

Показаны различия в прогнозируемых значениях напряженности электромагнитного поля, модовой структуре сигнала и углах прихода радиоволны.

Предложено создание комбинированной методики, позволяющей существенно сократить время проведения вычислений и повысить адекватность описания ионосферной обстановки.

Созданные заделы могут быть использованы при разработке систем поддержки принятия решений операторов радиопунктов.



Результаты моделирования траектории радиосигнала

Публикации: Зачатейский Д. Е., Анишин М. М., Карпенко Е. А. Прогнозирование условий ионосферного распространения радиоволн в системах поддержки принятия решений // Радиоп физика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов II Российской научной конференции (Омск, 5–7 октября 2022 года). Омск : ОНИИП, 2022. С. 21–22.

2.2 Повышение помехоустойчивости радиосети коротковолнового диапазона

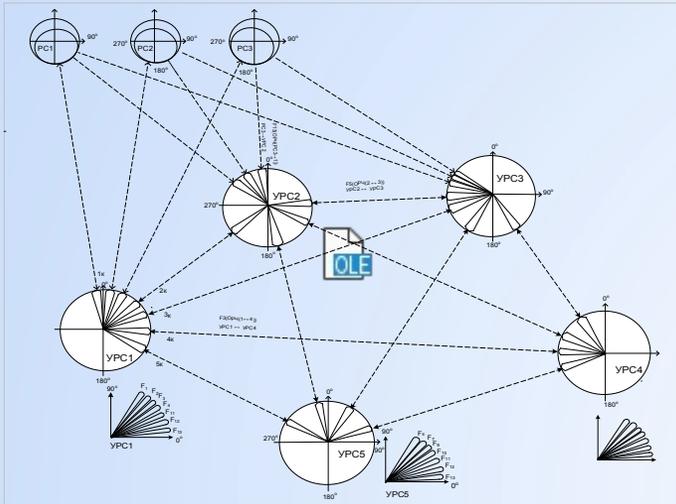
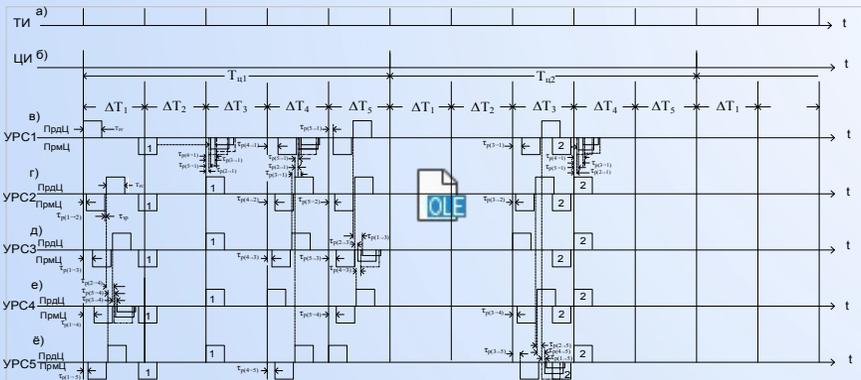


Схема расположения узлов связи



Временные диаграммы радиосигналов

Автор: Зачатейский Д.Е.

Расчетными методами показан положительный эффект от использования временного разделения радиоканалов и множественной ретрансляции радиogramм в ведомственной сети связи коротковолнового диапазона. Получены зависимости повышения помехоустойчивости от количества пунктов ретрансляции. Описан способ организации информационного обмена в перспективной радиосети.

Полученные решения могут быть положены в основу разработки алгоритмов работы когнитивной радиосети, обеспечивающей гарантированную доставку информации как между базовыми станциями сети (стационарными КВ радиостанциями), так и между мобильными абонентами, а также совершенствования существующих правил ведения радиосвязи в ведомственных радиосетях.

2.3 Оценка комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности с использованием технологии LoRa

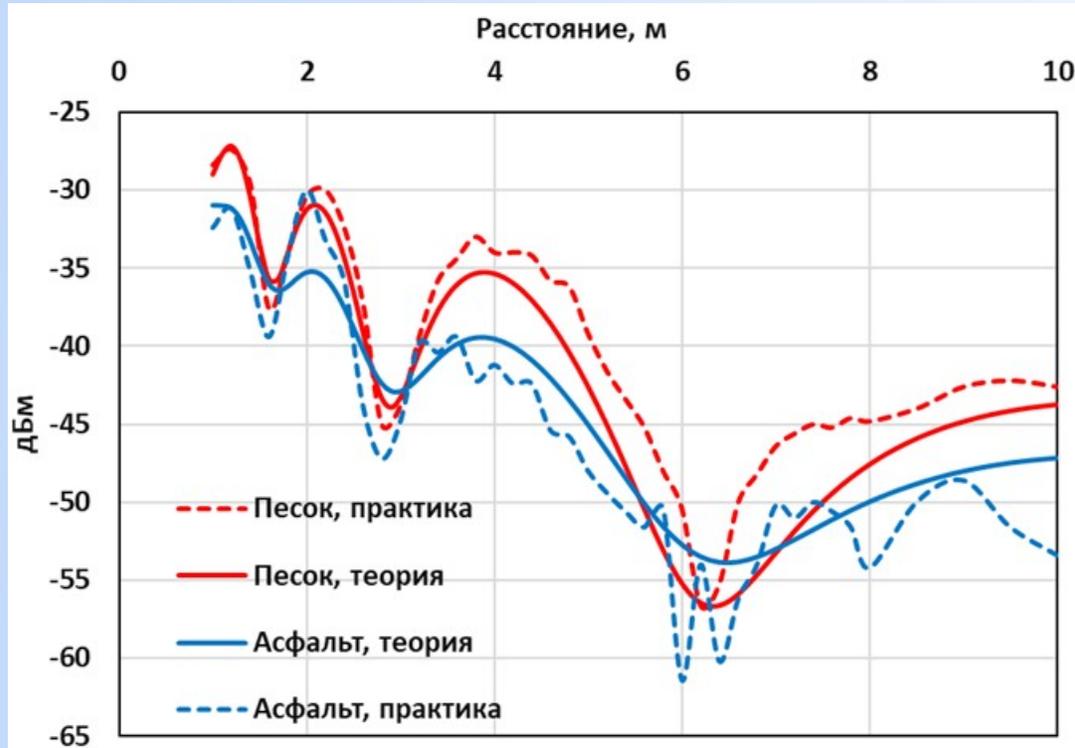
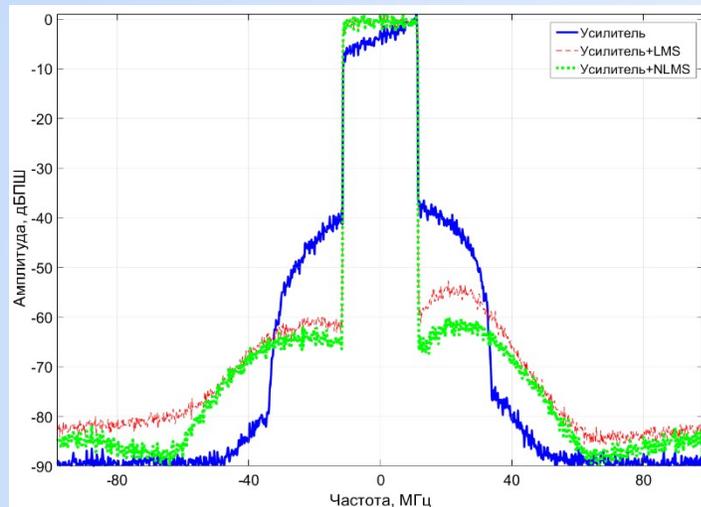


График зависимости показателя уровня принимаемого сигнала от расстояния для горизонтальной поляризации

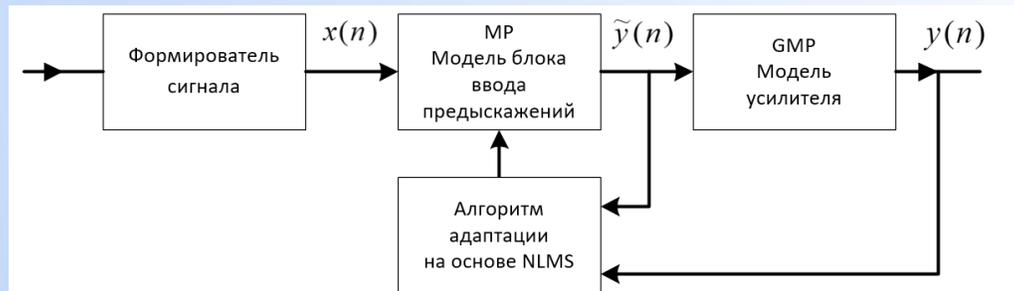
Авторы: Варнаков С.А, Яценко А.С.

Проведённые исследования выявили влияние интерференционных процессов на уровень принимаемого сигнала модулем LoRa. Обнаружено, что уровень принимаемого сигнала, в особенности в точках интерференционного максимума и минимума, определяется значением КДП подстилающей поверхности. Разница между уровнями сигнала, соответствующими интерференционным максимумам и минимумам, увеличивается с увеличением комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности. Для разработки методики оценки комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности при помощи технологии LoRa необходимо проведение дальнейших исследований и накопление экспериментальных данных. В частности необходимо провести дополнительные измерения для поверхностей с крайне малым (толстый слой снега) и большим (поверхность воды) значениями диэлектрической проницаемости.

3.1 Повышение эффективности подавления нелинейных искажений на выходе усилителя мощности



Спектр на выходе нелинейной модели усилителя



Структурная схема предлагаемого алгоритма адаптации на основе NLMS

Авторы: Кащенко И.Е. Павлов А.П. Бахмуцкая А.В.

Проблема: Алгоритмы адаптации на основе LMS не дают высокой скорости сходимости и не всегда устойчивы при плохой обусловленности матрицы $X_m(n) \cdot X_m^H(n)$ параметров инверсной модели усилителя мощности, что приводит к недостаточному подавлению **нелинейных искажений на выходе усилителя мощности**. Использование более устойчивых и «быстрых» алгоритмов на основе RLS требует больших вычислительных затрат.

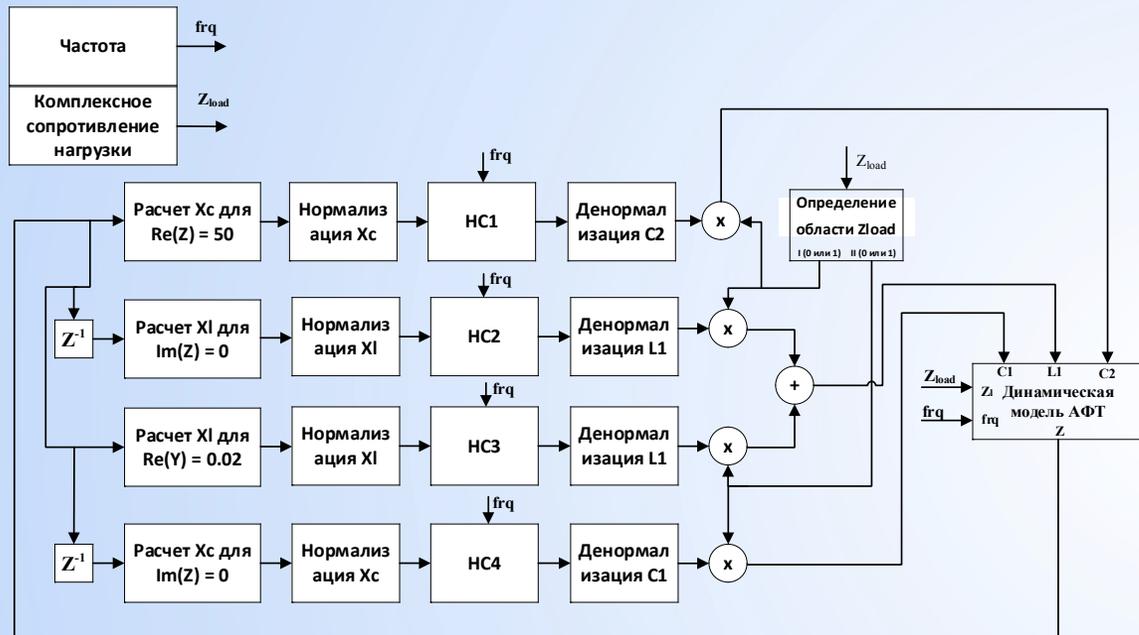
Решение: Применение нормализованного LMS (NLMS) метода для алгоритма адаптации параметров инверсной модели усилителя мощности.

Преимущества: Скорость сходимости выше, чем у обычного LMS, более устойчив к плохой обусловленности матрицы $X_m(n) \cdot X_m^H(n)$ параметров инверсной модели усилителя мощности.

Публикации: Кащенко И. Е., Павлов А. П., Бахмуцкая А. В. Алгоритм адаптации системы ввода предсказаний на основе нормализованного метода наименьших квадратов // Радиотехника. 2022. Т. 86, №8. С. 21-28.

3.1 Согласование антенно-фидерного тракта коротковолнового диапазона радиоволн на базе нейронных сетей с распределением зон ответственности

Авторы: Павлов А.П. Кащенко И.Е. Бахмуцкая А.В.



Структурная схема модели АнСУ на базе нейронных сетей с распределением зон ответственности.

Проблема: Классические алгоритмы согласования антенно-фидерного тракта не обеспечивают достаточной скорости согласования антенно-фидерного тракта КВ диапазона радиоволн для использования при работе радиопередающих систем в режимах с быстрой перестройкой по частоте (поисковые) или не устойчивы к изменениям характеристик согласующего контура под воздействием внешних факторов окружающей среды (расчетные). **Решение:** Применение алгоритма согласования на базе нейронных сетей с распределением зон ответственности.

Преимущества: Высокая скорость согласования, устойчивость к внешним факторам, высокая точность во всей области согласования.

Публикации: Павлов А.П., Кащенко И.Е., Бахмуцкая А.В. Алгоритм согласования антенно-фидерного тракта коротковолнового диапазона радиоволн на базе нейронных сетей с распределением зон ответственности // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 11. С. 51–56.

3.3 Метод повышения эффективности аperiodических антенн

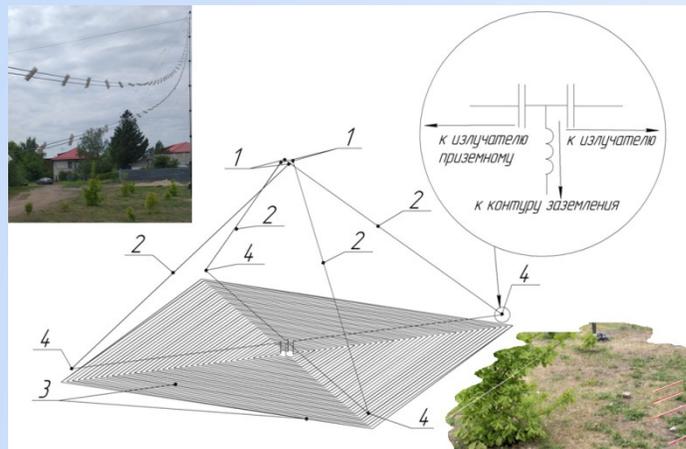


Рис.1 Внешний вид антенны аperiodической с оконечными нагрузками замещенными приземной (стелющейся) антенной

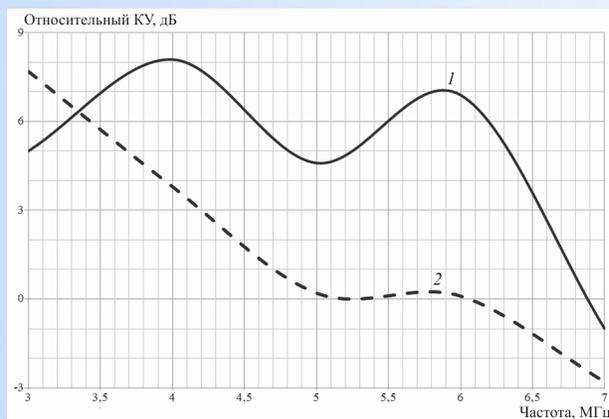


Рис. 2 Коэффициент усиления (КУ) АА относительно антенны, построенной по оригинальному методу, с фазовыми корректорами (1) и без (2)

Авторы: Ю.А. Костычев, С.В. Кривальцевич, К.А. Майненгер, А.В. Боков

Цель. Разработка метода повышения эффективности аperiodических антенн ДКМВ диапазона с оконечными нагрузками при сохранении широкополосности (согласования), установочных и габаритных размеров, простоты конструкции и обеспечения высокого уровня подводимой к аperiodической антенне мощности.

Результаты. Предложен и обоснован метод повышения эффективности АА, заключающийся в замещении ОН приземной четырёхзаходной спиральной антенной введением в конструкцию излучателя фазовых корректоров. Проведен сравнительный анализ коэффициента усиления аperiodической антенны, построенной согласно предлагаемому и оригинальному методам. Приведены результаты расчетов, электродинамического моделирования и экспериментальных исследований (АА высотой 8 метров, установленной на площадке 20x20 м подводимая мощность 1кВт).

Практическая значимость. Представленный метод обеспечивает повышение эффективности в нижней части ДКМВ диапазона (3-6 МГц) АА в среднем на 6 дБ (рост КПД в 4 раза) и может применяться как при проектировании, так и для реконструкции и модернизации (без изменения установочных размеров) антенн радиоцентров и ионозондов.

3.5 Разработан и прошёл апробацию метод определения постоянной распространения электромагнитной волны вдоль провода излучателей приземных стелющихся антенн ДКМВ диапазона

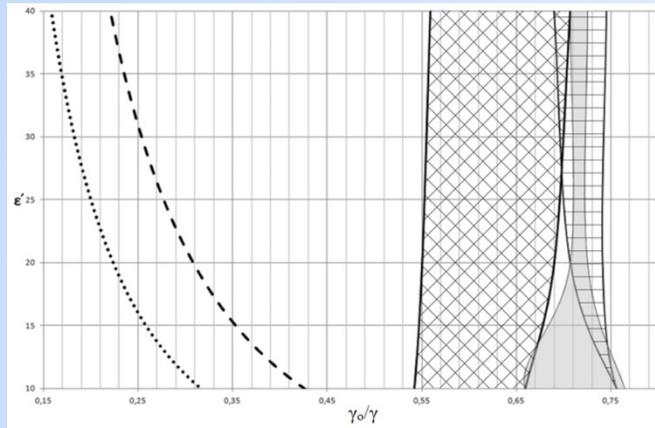
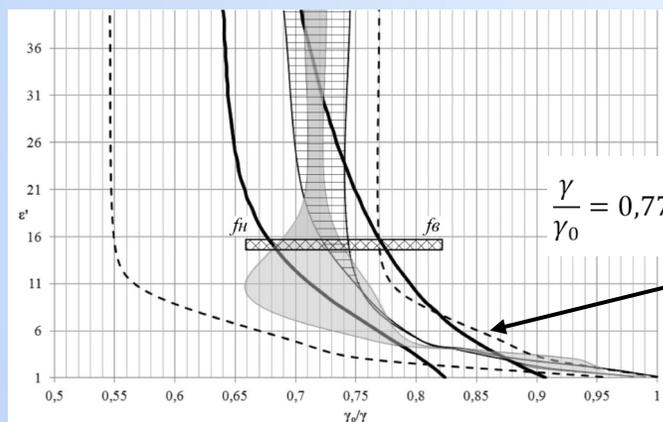


Рис.1 Графики зависимостей значений диэлектрической проницаемости от γ_0/γ в ДКМВ диапазоне, определенные по известным аналитическим представлениям и с помощью электродинамического моделирования



$$\beta = \beta_0 \varepsilon'^{0,1}$$

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = 0,77 \cdot \varepsilon^{\nu} \cdot \left[1 + \nu \cdot \exp\left(1 - \nu \frac{\varepsilon''}{\varepsilon}\right) \right]$$

$$(\nu=0,1)$$

Рис. 2 Графики ε' от γ_0/γ . Штрихованный прямоугольник – результат измерений ($\varepsilon'=15$), область, ограниченная сплошной линией - ε' по предлагаемой формуле (остальное – результаты моделирования)

Авторы: Ю. А. Костычов, А. С. Яценко, С.В. Кривальцевич

Цель. Верификация известных способов вычисления постоянной распространения волны ($\gamma=\alpha+i\beta$, γ_0 – для воздуха) вдоль проводника стелющейся антенны ДКМВ диапазона по критерию точности. Оценка точностных показателей существующих методов и обсуждение их применимости для решения практических задач. Представление новой зависимости для более точного определения постоянной распространения волны в рассмотренных условиях.

Результаты. Результаты апробации известных аналитических способов вычисления γ , а также натурные и вычислительные эксперименты позволили сформулировать новую зависимость γ от характеристик подстилающей поверхности, отличающуюся наибольшей точностью. Предложенный и прошедший апробацию метод восстановления характеристик подстилающей поверхности ε по характеристикам (γ) приземных антенн позволил снизить погрешность восстановления с 18% до 4%.

Практическая значимость. Представленный способ определения постоянной распространения волны может быть применен как при проектировании приземных антенн, так и для неразрушающего и оперативного измерения диэлектрических характеристик почвы

3.6 Повышения избирательности по зеркальному каналу в цифровых радиоприемниках

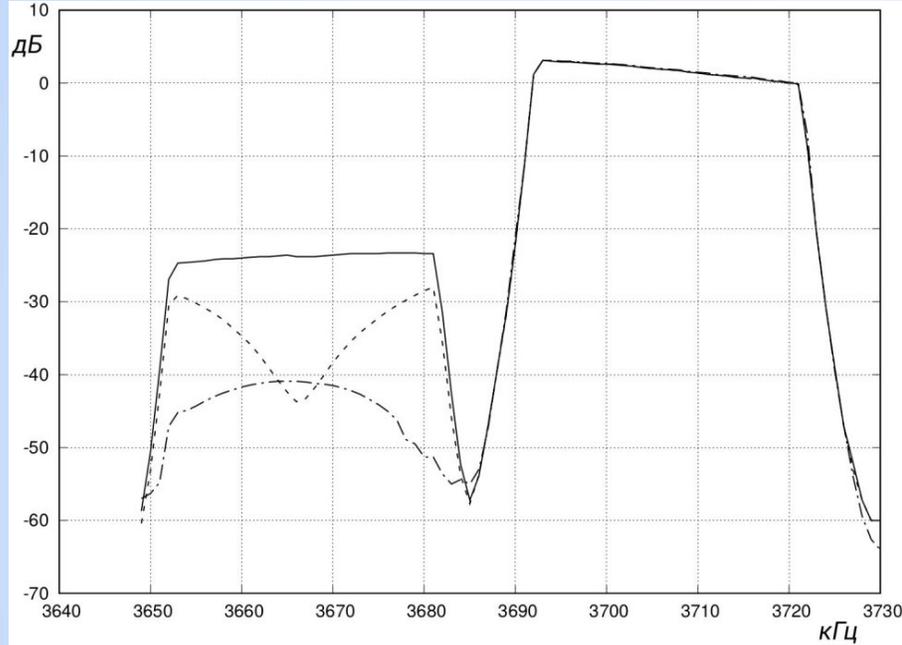


Рис.1. Результат эксперимента. Сплошная линия – без компенсации, штриховая – с традиционной компенсацией, штрихпунктирная – с компенсацией по предложенному способу.

Авторы: Юрков А.С.

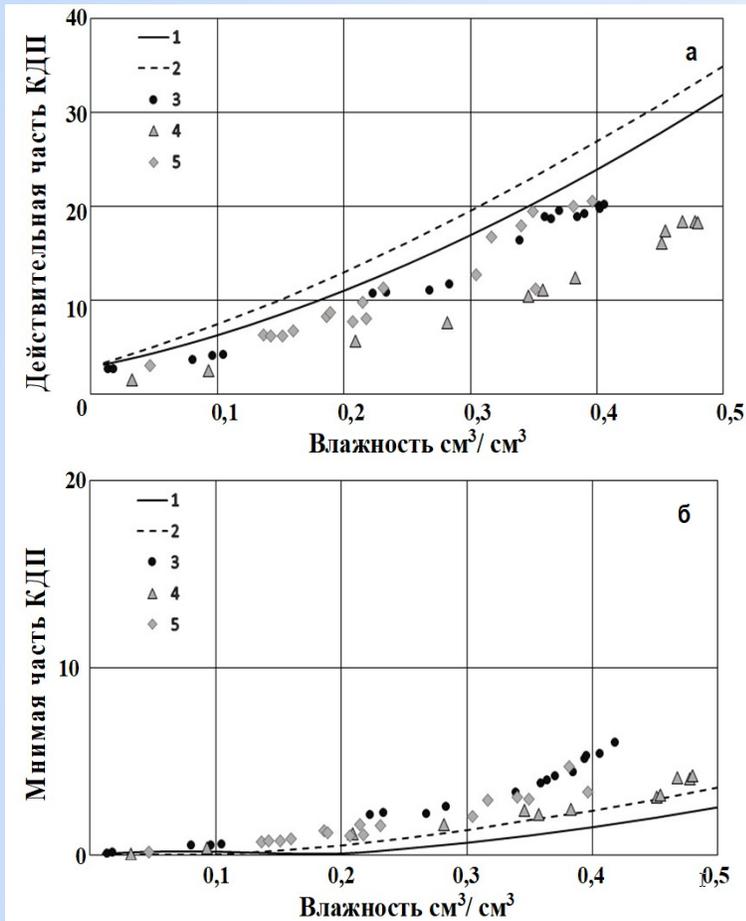
Разработан и экспериментально проверен оригинальный способ повышения избирательности по зеркальному каналу в цифровых радиоприемниках с аналоговым переносом на низкую промежуточную частоту. Этот способ основан на программной компенсации погрешностей амплитуды и фазы, неизбежно возникающих в квадратурных каналах аналоговой части приемника. В отличие от ранее известных систем такого рода, при данном способе можно улучшить избирательность в широкой полосе частот. Эксперимент показал, что применение данного способа позволяет улучшить подавление паразитного канала с 25 до 44 дБ, причем во всей полосе принимаемых частот (традиционные методы при данной аппаратуре дают такой результат лишь в полосе в восемь раз меньше).

Публикации: Юрков А. С. Результаты экспериментального исследования широкополосного цифрового подавления зеркального канала в SDR-приемнике с аналоговым преобразованием на низкую промежуточную частоту // Техника радиосвязи.2022. Выпуск 2 (53). С. 90-97.

4.1 Особенности диэлектрических характеристик почв Арктики умеренной климатической зоны



Авторы: Варнаков С.А., Яценко А.С., Кривальцевич С.В.



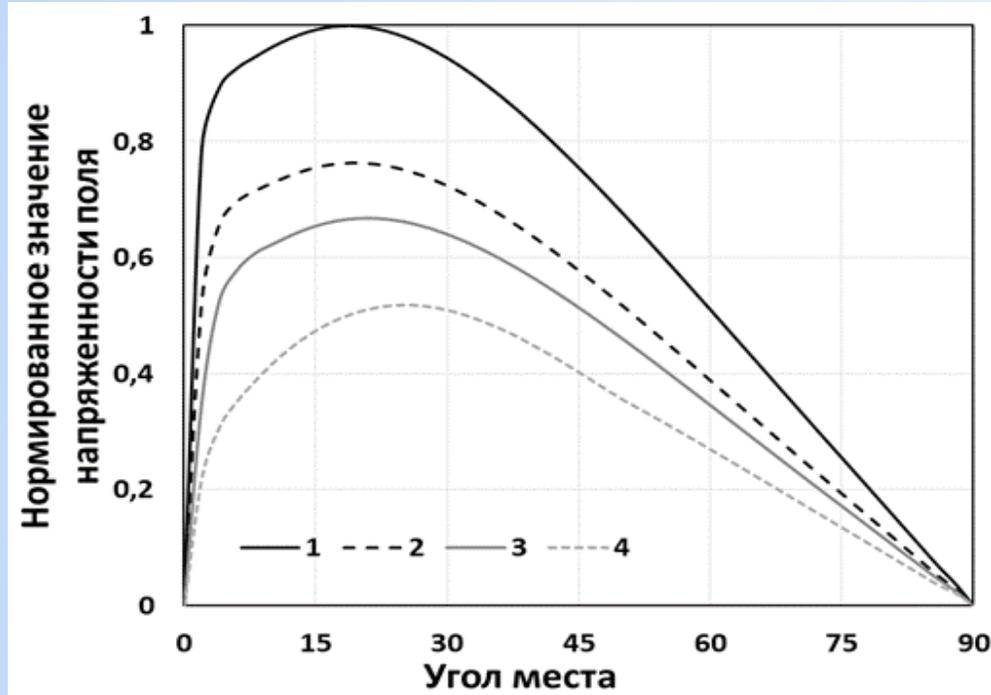
Измерены данные о комплексной диэлектрической проницаемости почв Арктики и юга Западной Сибири в диапазоне частот от 0,1 до 4 ГГц. Обнаружено, что вид экспериментально определённых и теоретически рассчитанных зависимостей диэлектрической проницаемости от влажности, соответствующих разным типам почв, заметно отличаются друг от друга. Полученные эмпирические зависимости могут быть использованы при совершенствовании моделей диэлектрических смесей, а так же оценке радиофизических характеристик некоторых типов влажных почв Арктики и суглинистой почвы юга Западной Сибири в диапазоне частот от 0,1 до 4 ГГц, которые в свою очередь находят применение при оценке характеристик радиотрасс, обработке данных спутниковых радиометров и радиолокаторов, геолокационном зондировании и др.

Зависимость действительной и мнимой части КДП почв от влажности.

- 1 – модель Добсона для суглинка; 2 – модель Добсона для песчаного суглинка;
- 3 – экспериментальные результаты образца суглинистой почвы юга Западной Сибири,
- 4 – эксперимент, образец органической почвы Арктики,
- 5 – эксперимент, образец минеральной почвы Арктики. Частота 2500 МГц. Температура +24°C.

Публикации: Варнаков С.А., Суслов К.Н., Яценко А.С., Кривальцевич С.В. Диэлектрические характеристики образцов почв Арктики и юга Западной Сибири // Радиотехника. 2022. Т. 86, №8. С. 37-44.

4.2 Влияние подстилающей поверхности на разных этапах испарения почвенной влаги на направленные характеристики приповерхностного вертикального четвертьволнового монополя в ДКМВ-диапазоне



Направленные характеристики четвертьволнового монополя, расположенного вблизи поверхности суглинистой почвы.

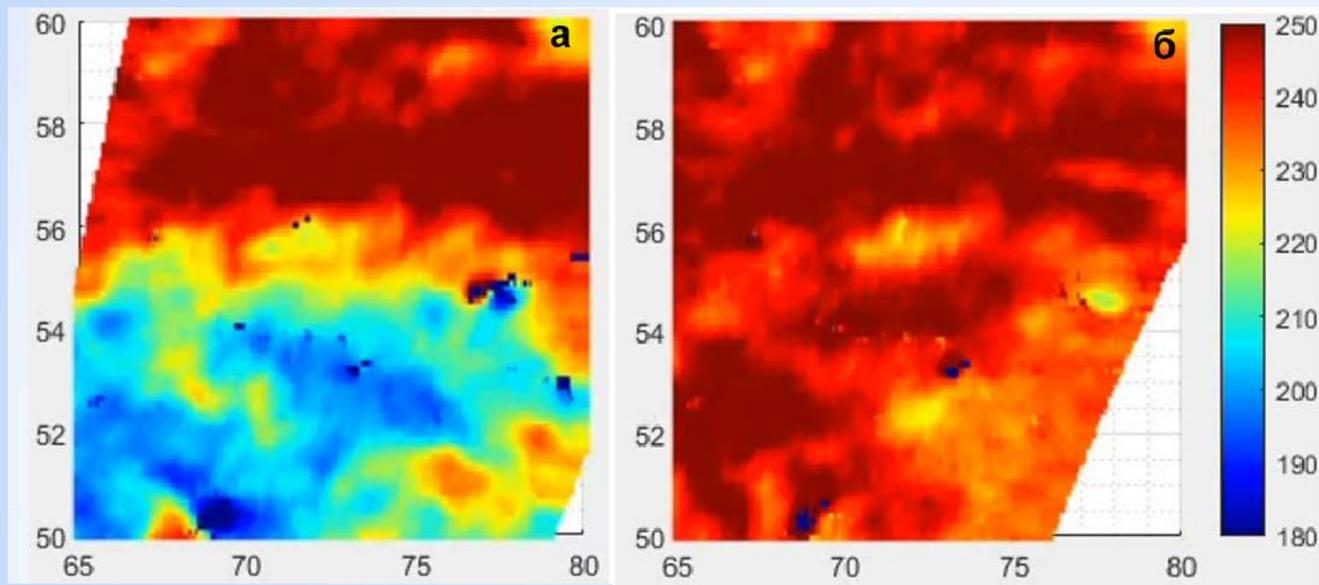
- 1 – однородная почва с влажностью 20 %;
- 2 – неоднородная почва, точка перегиба функции влажности на глубине 0,2 м;
- 3 – неоднородная почва точка перегиба функции влажности на глубине 0,4 м;
- 4 – однородная почва с влажностью 2 %. Частота 10 МГц.

Авторы: Яценко А.С., Немчанов К.В.

В результате проведённых модельных расчётов продемонстрировано влияние вида профиля влажности, обусловленного испарением в поверхностном слое почв, на направленные характеристики четвертьволнового монополя. В зависимости от вида профиля влажности отличия в значениях коэффициента усиления могут достигать 50% в относительных величинах; также наблюдается изменение угла места, соответствующего максимальному коэффициенту усиления. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости привлечения данных о вертикальном распределении влаги в поверхностном слое почв при оценке направленных характеристик излучающих систем с высокой степенью точности. В дальнейшем предполагается разработать более точную модель влагоперноса в поверхностном слое почв. Такая модель позволит прогнозировать вид профиля влажности (и КДП с ней связанной) при наличии временного ряда метеоданных.

4.3 Особенности временного хода радиояркостной температуры подстилающей поверхности, измеренной спутниковыми микроволновыми радиометрами

Авторы: Яценко А.С.

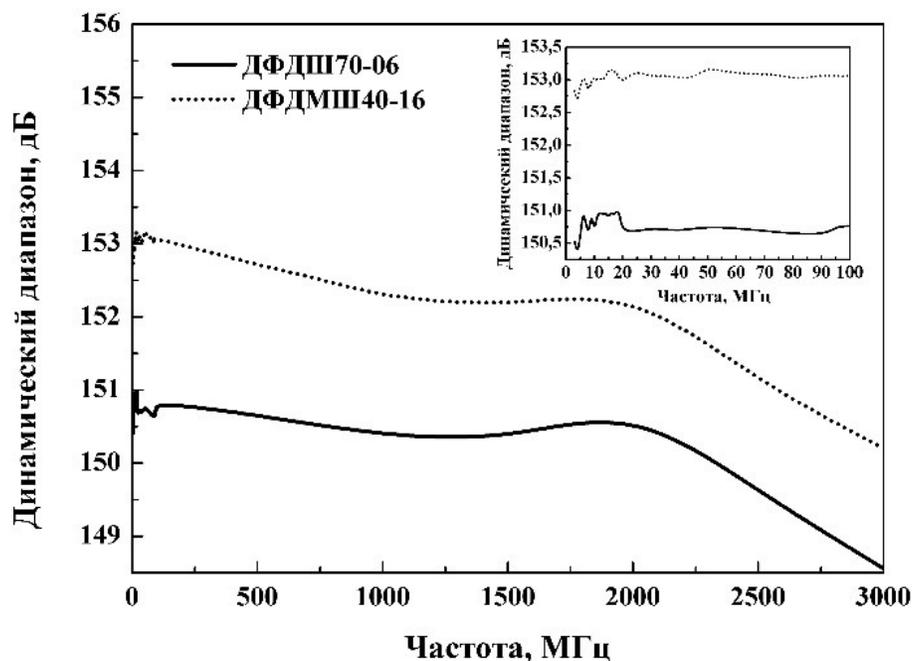


Карта радиояркостной температуры для территории юга Западной Сибири и Северного Казахстана, построенной по данным спутника SMAP; незамёрзшее состояние (а) в промёрзшее состояние (б).

Радиометрические данные, полученные в дециметровом диапазоне волн, в наибольшей степени чувствительны к изменению диэлектрической проницаемости поверхностного слоя почв. Данная зависимость позволяет осуществлять дистанционный мониторинг влагосодержания и состояния почв (талая/мёрзлая). Анализ временного ряда радиояркостной температуры, построенный для отдельных участков поверхности в степной и лесостепной климатических зонах, показал, что данные спутника SMAP, при определённых условиях, позволяют идентифицировать интерференционные процессы радиотеплового излучения, сопутствующие процессу промерзания. Это позволит в перспективе разработать метод определения глубины промерзания почвы по данным спутниковых микроволновых радиометров

Публикации: 1. Яценко А.С. Особенности временного хода радиояркостной температуры подстилающей поверхности, измеренной аппаратами SMOS и SMAP, в процессе промерзания // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С.351. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a

5.1 Исследование радиопотонного тракта



Частотная зависимость динамического диапазона по блокированию ВОЛС с приемными оптическими модулями ДФДШ70-06 и ДФДМШ40-16

Авторы: Давлеткильдеев Н. А., Никифорова А. О., Мосур Е. Ю., Кривальцевич С. В.

Определены основные параметры, характеризующие эффективность передачи радиосигналов в ВЧ, ОВЧ, УВЧ диапазонах по аналоговой волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), построенной на базе передающего модуля с прямой модуляцией оптического излучения. Построенная ВОЛС проявляет лучшие характеристики, связанные с коэффициентом передачи и динамическим диапазоном по блокированию в ВЧ-ОВЧ диапазоне, поскольку с увеличением частоты сигнала происходит плавное уменьшение данных параметров линии. Оценка применимости данной ВОЛС показала, что динамический диапазон по блокированию и динамический диапазон по интермодуляционным искажениям третьего порядка в ряде случаев не соответствуют требованиям, предъявляемым к динамическим характеристикам ВЧ радиоприемников, что может ограничивать использование исследуемой ВОЛС в комплексах радиосвязи, работающих в ВЧ диапазоне.

Публикации: Давлеткильдеев Н. А., Никифорова А. О., Мосур Е. Ю., Кривальцевич С. В. Исследование характеристик аналоговой волоконно-оптической линии передачи радиосигналов в ВЧ-, ОВЧ-диапазоне // *Техника радиосвязи*. 2022. Выпуск 1 (52). С. 51–61. DOI: 10.33286/2075-8693-2022-52-51-61.

Давлеткильдеев Н. А., Никифорова А. О., Мосур Е. Ю., Кривальцевич С. В. Изучение эффективности передачи ВЧ, ОВЧ, УВЧ сигналов по аналоговой волоконно-оптической системе передачи с прямой модуляцией лазерного излучения // *Электромагнитные волны и электронные системы* (Принята в печать).

5.2 Общая теория флексоэлектрического изгиба тонких пластинок

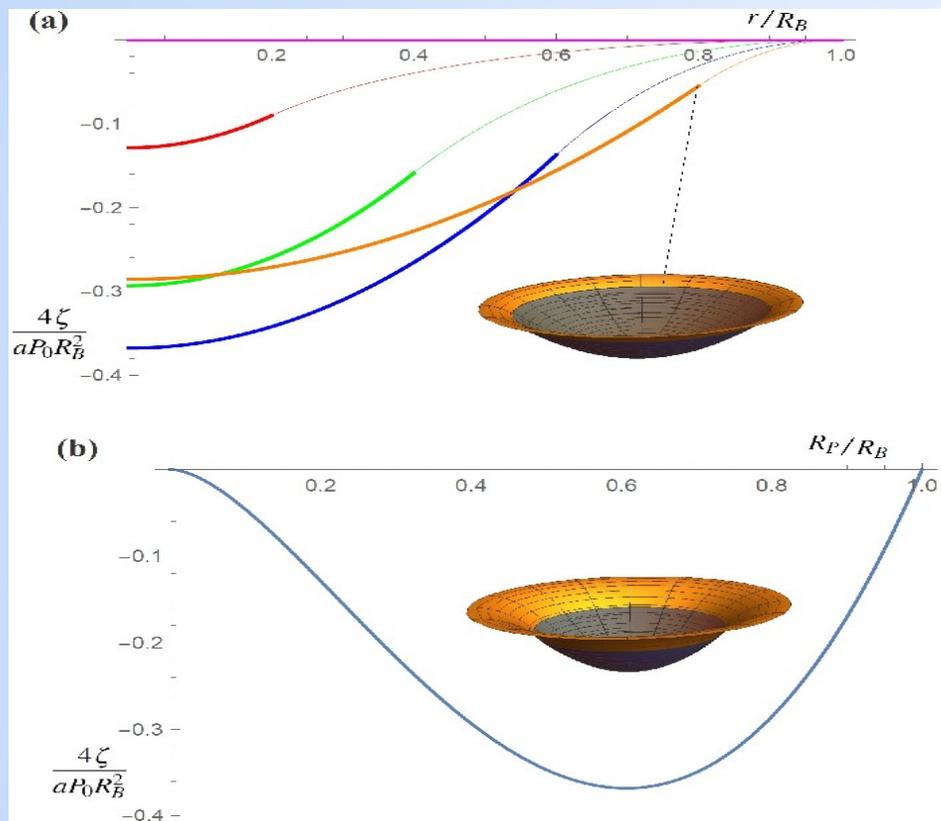


Рис.1.(a) – Зависимость изгиба пластины от радиальной координаты для разных размеров электродов. (b) – Зависимость максимального изгиба от размера электродов.

ИРФЭ ОНЦ СО РАН, Институт Теплофизики СО РАН

Юрков А.С., Юдин П.В.

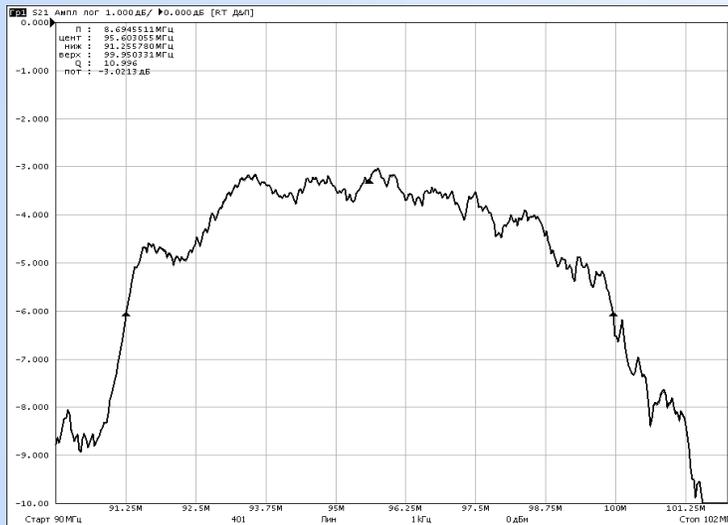
Развита общая теория флексоэлектрического изгиба тонких пластинок, имеющая важное значение для создания элементов функциональной наноэлектроники на основе флексоэлектрического эффекта (нанорезонаторов, наноактуаторов и т.д.). На основе разработанной общей теории получены инженерные формулы для изгиба круглой пластинки с круглыми электродами различных размеров для двух типов граничных условий на краю: для заземленного края и для свободного. Для наиболее важного для практики случая заземленного края получен ранее не известный результат: имеется оптимальный размер электродов, составляющий около 60 % от диаметра пластинки. При большем размере электродов величина флексоэлектрического изгиба уменьшается и при электродах, полностью покрывающих пластину, обращается в ноль.

5.3 Методика подавления паразитных акустических откликов в устройствах на ПАВ



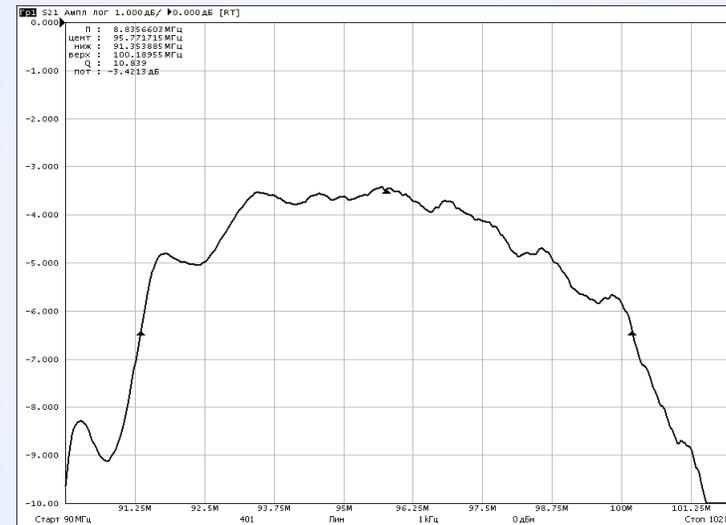
Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН
Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Авторы: *Доберштейн С.А., Косарев Б.А.*



(а)

Амплитудно-частотные характеристики устройства на ПАВ до механической обработки (а) и после механической обработки (б)



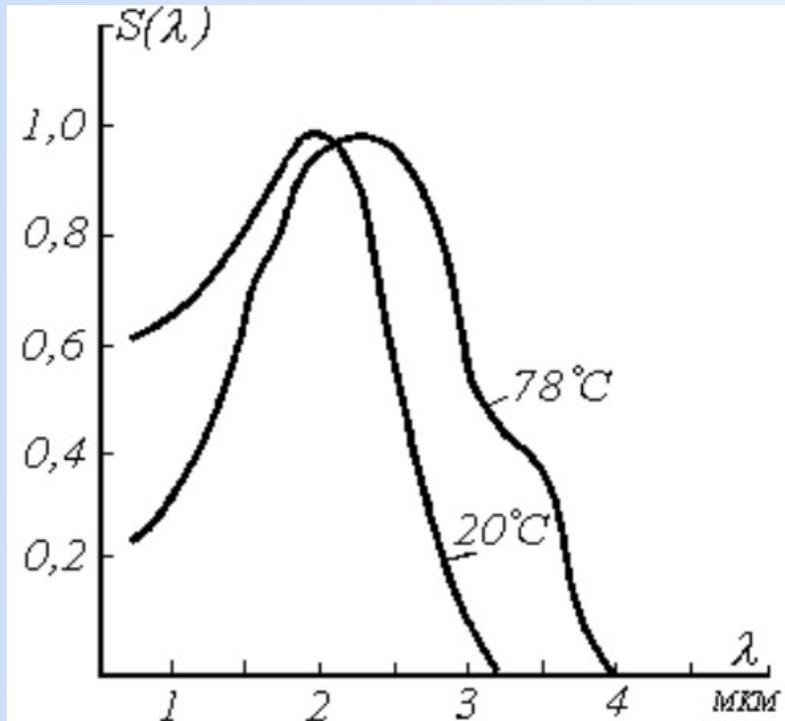
(б)

Рассмотрена методика подавления паразитных акустических откликов в устройствах на ПАВ путем увеличения шероховатости нерабочей стороны пьезоподложки. Отмечено, что в зависимости от вида используемой в устройстве акустической волны уменьшается амплитуда пульсаций в полосе пропускания фильтра или увеличивается его избирательность

Публикации: Доберштейн С.А., Косарев Б.А. Исследование уменьшения влияния паразитных акустических откликов в устройствах на ПАВ // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : Тезисы докладов II Российской научной конференции, Омск, 05–07 октября 2022 года. – Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2022. – С. 178-179.

Доберштейн С. А., Косарев Б.А. Уменьшение влияния паразитных акустических откликов в устройствах на ПАВ за счет шероховатости на нерабочей стороне пьезоподложки // Техника радиосвязи. 2022. № 3(54). С. 111-122.

5.4 Анализ влияния колебаний температуры окружающей среды на значения параметров устройств функциональной электроники



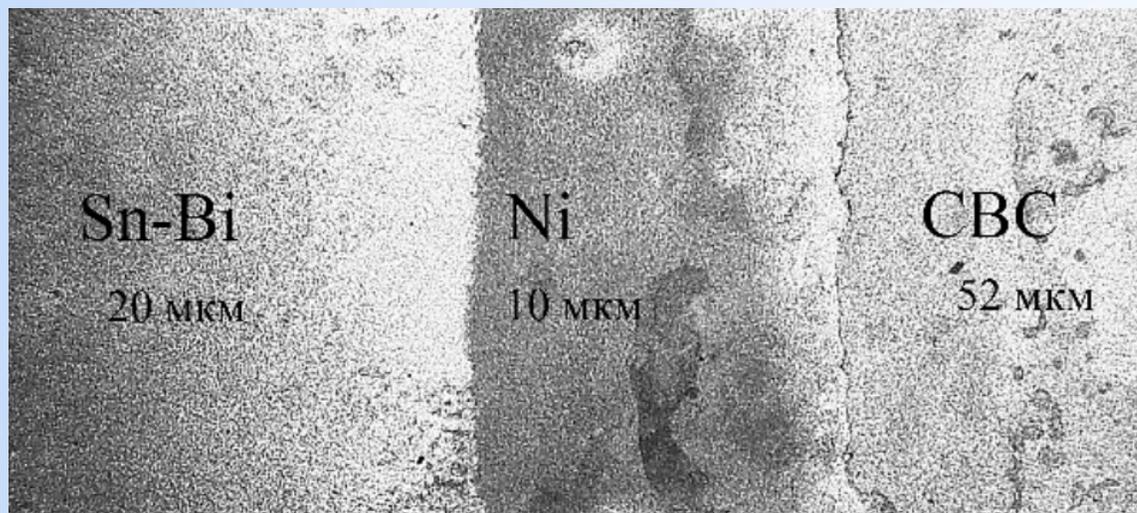
Сдвиг спектральной характеристики фотодиода при увеличении температуры

Авторы: Кривальцевич С.В., Косарев Б.А.

Рассмотрена зависимость от температуры параметров устройств функциональной электроники. Показано, что причиной отклонений параметров устройств является влияние температуры на лежащие в их основе физические явления и процессы, такие как акустические волны, образование электронно-дырочных пар фотонами, взаимная ориентация спиновых моментов атомов в доменах, химическая активность молекул и подвижность ионов в электролите.

Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН
Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Авторы: Корж И.А., Косарев Б.А.



Поверхность энергетической фольги после осаждения припоя

Предложена технология гальванического осаждения припоя (олово-висмут) на поверхность энергетической фольги Ni/Al. По результатам экспериментов обнаружена зависимость качества покрытия от толщины подслоя (никель) и условий предварительной обработки поверхности энергетической фольги в водном растворе кислот.



**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ НАНО – И МИКРОСИСТЕМ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СЕЛЕКЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛОВ СВЧ
ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР,
ФОРМИРУЕМЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМИ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ**

(Промежуточный)

Номер темы в ИСГЗ «ПАРУС» FWEE-2021-0005

Основные результаты





ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ НАНО – И МИКРОСИСТЕМ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СЕЛЕКЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛОВ СВЧ ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ФОРМИРУЕМЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМИ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Цель исследования - моделирование механизмов формирования и разработка технологий конструирования тонкопленочных материалов и пьезоэлектрических структур с заданными свойствами и нано – и микросистем на их основе для проектирования и изготовления элементной базы радиотехнических устройств селекции и генерации сигналов СВЧ диапазона на объемных и поверхностных акустических волнах.



План работы на 2022 год:

1. Моделирование кинетики частиц молекулярной плазмы, инициируемой в разрядах разного типа (ВЧ- разряд, разряд постоянного тока, магнетронный разряд), в зависимости от стехиометрического состава рабочего газа, конфигурации разрядной камеры, внешних параметров.
2. Разработка моделей процессов, протекающих на поверхности подложки, и определение механизмов и моделей роста пленок Al, AlN.
3. Разработка системы комплексного контроля параметров пленок, формируемых плазмохимическими методами.
4. Исследование параметров и свойств пленок AlN, Al, Mo, V (текстура, фазовый и элементный состав, морфология поверхности, механические напряжения, оптические, электрофизические и механические свойства) в зависимости от технологических режимов формирования.
5. Разработка конструкции резонатора с пьезоэлектрическим слоем AlN.
6. Создание, исследование и моделирование резонаторов и фильтров на поверхностных поперечных акустических волнах (STW) для диапазона частот 0,5-2,0 ГГц.
7. Исследования параметров ПАВ-фильтров и ПАВ-резонаторов на различных пьезоматериалах для диапазона частот 0,03-1,5 ГГц.

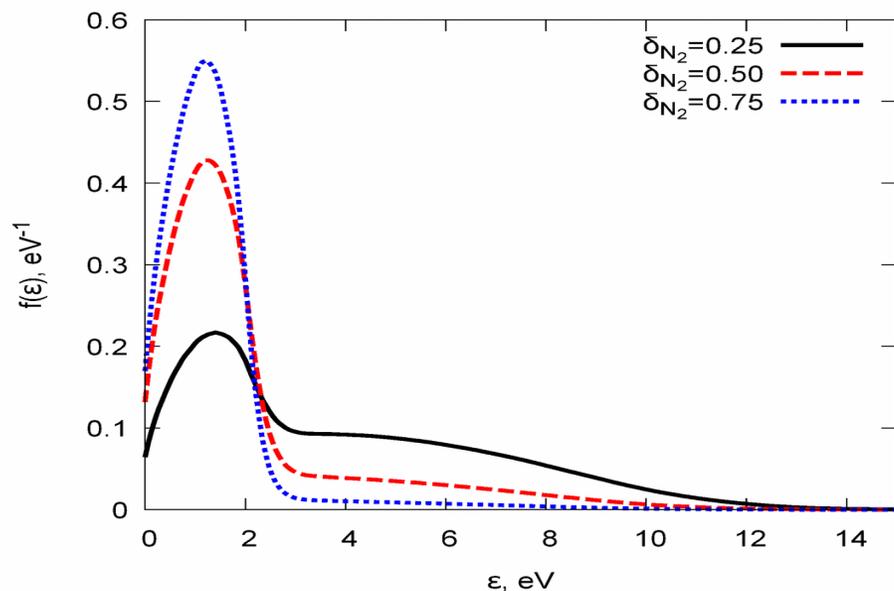


Ожидаемые результаты по итогам 2022 года:

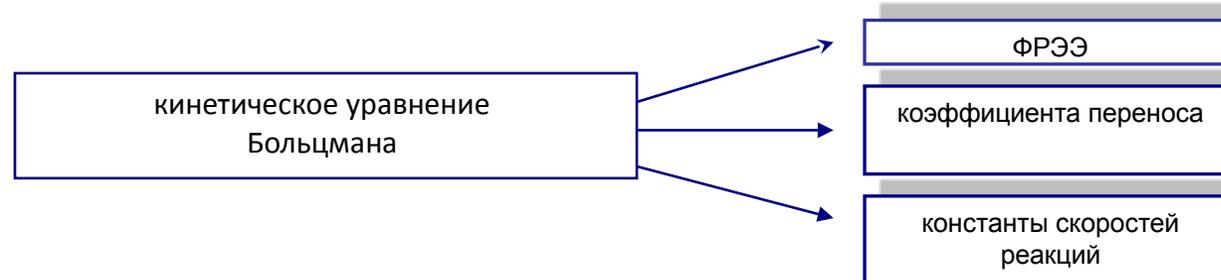
1. Модель кинетики частиц молекулярной плазмы, инициируемой в разрядах разного типа, в зависимости от состава рабочего газа, внешних параметров. Численное описание процессов в плазме газового разряда, содержащего частицы конденсированной дисперсной фазы: процесса зарядки макрочастиц, влияние на кинетику электронной подсистемы, на кинетику химически-активных компонентов и на макроскопические характеристики плазмы
2. Модель кинетики процессов, протекающих в газовой фазе и на поверхности подложки формирования пленок AlN, Al, Mo, V. Равновесный состав потока реагентов на подложку. Модели роста пленок Al, AlN.
3. Система комплексного контроля параметров пленок, формируемых плазмохимическими методами.
4. Результаты исследования взаимосвязи равновесного состава реагентов в газовой фазе и на поверхности с технологическими режимами формирования пленок.
5. Конструкция и образцы резонатора на объемных акустических волнах с пьезоэлектрическим слоем AlN.
6. Конструкция и образцы резонатора и фильтров на поверхностных поперечных акустических волнах (STW) для диапазона частот 0,5-2,0 ГГц.
7. Оптимальные параметры ПАВ-фильтров и ПАВ-резонаторов на различных пьезоматериалах для диапазона частот 0,03-1,5 ГГц.
8. Публикации 10 материалов, в том числе 7 статей в базах Skopus и WoS.



Кинетика электронов в плазме электрического разряда в магнитном поле с учетом процессов неупругого взаимодействия в азот-аргоновой атмосфере



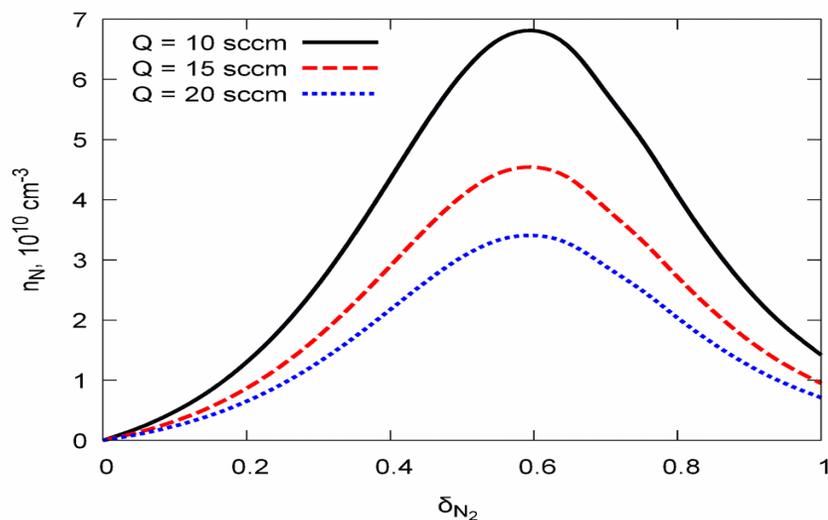
Ляхов А.А., Худайбергенов Г.Ж. Программа решения уравнения Больцмана для электронов низкотемпературной плазмы в присутствии пылевых частиц «EEDF_DUST» // Свидетельство регистрации программы для ЭВМ № 2022667847 от 27.09.2022 г.



Разработана программа для расчета функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в однородной низкотемпературной плазме, поддерживаемой внешним электрическим полем, с возможностью учёта в объеме монодисперсных макрочастиц сферической формы. Проведены кинетические расчеты для плазмы Ar+N₂.

Программа вычисляет ФРЭЭ, коэффициенты переноса, константы скоростей, долевые потери энергии электронов по различным неупругим процессам. Может использоваться для расчета кинетики электронов неравновесной плазмы, содержащей пылевые частицы

Модель объемных плазмохимических процессов при реактивном магнетронном распылении алюминия в смеси Ar+N₂



Концентрация атомарного азота в зависимости от стехиометрии смеси Ar+ N₂

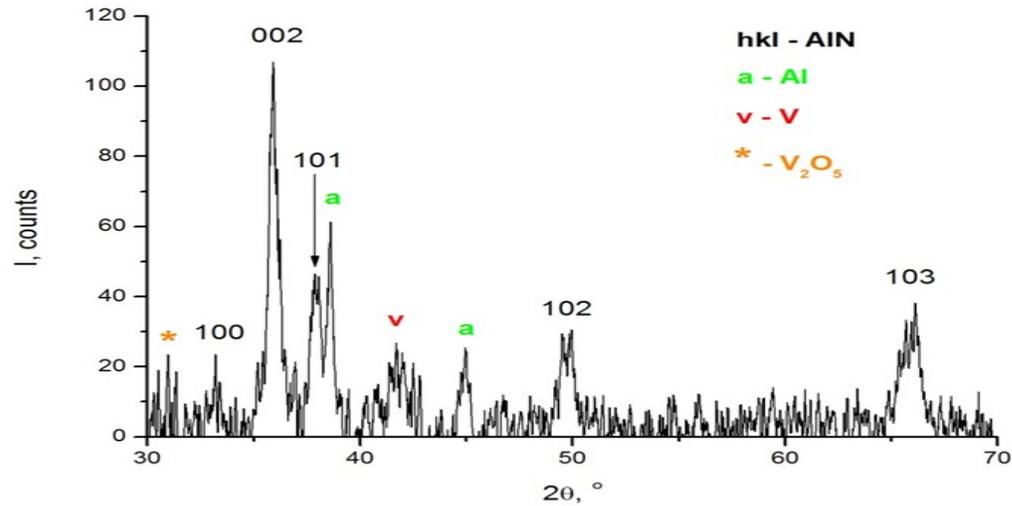
Strunin V.I., Lyakhov A.A., Khudaibergenov G.Zh. "Numerical study of nitrogen bulk dissociation in DC magnetron discharge in Ar+N₂ mixture" // J. Phys.: Conf. Ser. V. 2182. 012082 (2022) [DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012082]

На основе замкнутой системы уравнений макроскопического баланса для частиц N и N₂ и значения предварительно рассчитанной по ФРЭ константы скорости диссоциации, определена концентрация атомарного азота в плазме Ar+N₂, для условий работы магнетронной системы распыления:

$$n_N = \frac{2k_{dis}n_en_{N_2}^0}{k_{dis}n_e + 1/\tau}$$

Показано, что при заданном приведенном поле и концентрации электронов наблюдается максимум концентрации N в объеме при определенном составе рабочего газа.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛЕНКИ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ



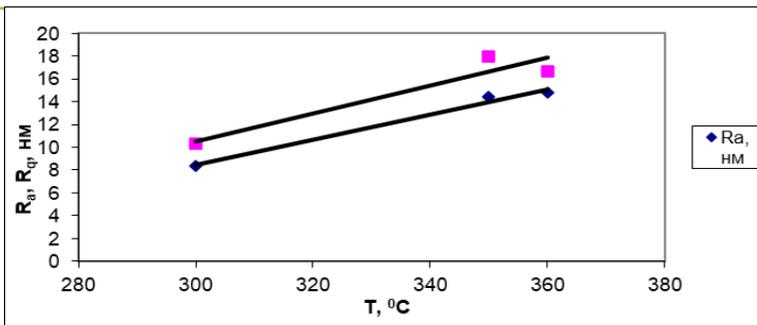
Рентгенограмма плёнки AlN.

Baranova L., Baysova B., Strunin V. Investigation of the structure of an aluminum nitride film for a Bragg reflector obtained by magnetron sputtering // Journal of Physics: Conference Series. 2270 (2022) 012044 doi:10.1088/1742-6596/2270/1/012044

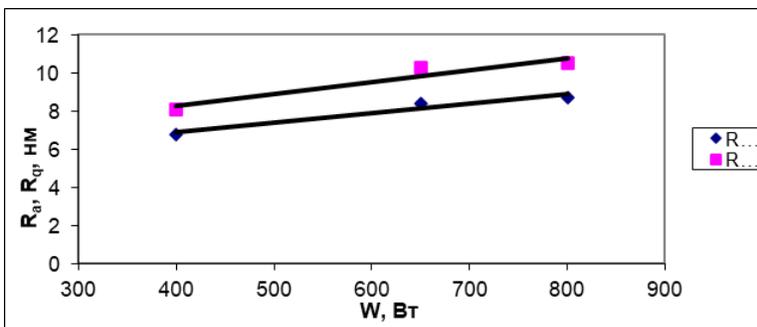
СВЧ-резонаторы с брэгговским отражателем на объемных акустических волнах (ОАВ) находят широкое применение в современной электронике благодаря хорошей воспроизводимости. При этом в тонкопленочных резонаторах в качестве резонансного элемента могут быть использованы пьезоэлектрические пленки нитрида алюминия. Поскольку, эффективность работы брэгговского отражателя напрямую зависит от структуры, фазового состава и морфологии поверхности тонких пленок, исследования характеристик тонкопленочных покрытий является актуальными.

В результате проведения исследований тонких пленок нитрида алюминия методом РФА установлена неоднородность фазового состава используемых подложек и превышение количественного содержания алюминия в исследуемых пленках. На рентгенограмме были обнаружены фазы AlN, Al и V, нанесённые при синтезе плёнки. Структурные параметры элементарной ячейки фаз AlN и Al соотносятся со справочными данными. Обнаружен эффект текстурирования полученной плёнки, проявляющийся в уменьшении интенсивности рефлексов 100 и 110 и резком возрастании интенсивности рефлекса 002.

Результаты исследования указывают на возможность получения пленок требуемого качества путем варьирования технологических режимов их формирования.



Зависимость шероховатости пленок AlN от температуры подложки



Зависимость шероховатости пленок AlN от мощности на мишени

Baranova L., Strunin V., Baysova B. The Dependence of the surface roughness of aluminum nitride films on the processing methods when magnetron sputtering is used // Journal of Physics: Conference Series. 2270 (2022) 012005. doi: 10.1088/1742-6596/2270/1/012005

При разработке микроэлектронных пьезоэлектрических структур совершенствование технологий получения пленок методом реактивного магнетронного распыления невозможно без выяснения ключевых механизмов влияющих на эффективность процесса осаждения и качество синтезируемого материала. Экспериментальный анализ дает возможность установить закономерности между свойствами пленок и внешними параметрами системы осаждения.

Определено, что в пленках, выращенных при температурах подложки от 300 до 360°C, шероховатость поверхности, как объемная, так и по профилю, увеличивается с 5-ти до 20-ти нм, на поверхности пленок образуется островковая мезоструктура, при дальнейшем увеличении температуры до 380°C шероховатость становится меньше 5 нм, происходит некоторое выравнивание рельефа.

Установлено, что при изменении мощности магнетрона в пределах от 400 до 900 Вт шероховатость поверхности невысокая, составляет от 4-х до 8-ми нм, увеличение шероховатости при мощностях 650 и 800 Вт объясняется тем, что при этих мощностях для данной температуры подложки происходит изменение фазового состава пленки, которое приводит к изменениям параметров кристаллической решетки пленок и росту шероховатости.



Исследование резонаторов на объемных акустических волнах с верхним пленочным электродом «алюминий-оксид алюминия»

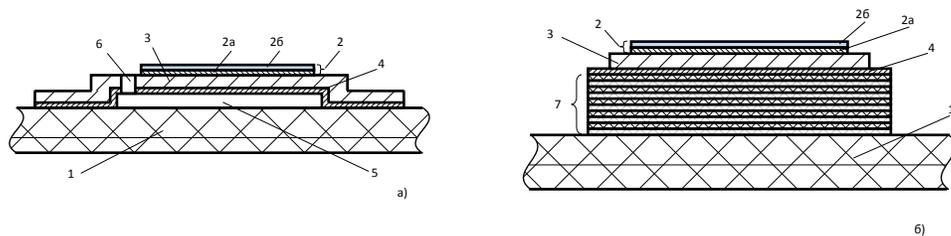


Рис. 1. Тонкопленочные ОАВ резонаторы: а) резонатор с воздушным зазором; б) резонатор с брэгговским акустическим отражателем; 1 – подложка; 2 – верхний электрод (2а – Al слой, 2б – Al_2O_3 слой); 3 – AlN пьезоэлектрический слой; 4 – нижний электрод; 5 – воздушный зазор; 6 – отверстие для травления; 7 – брэгговский акустический отражатель.

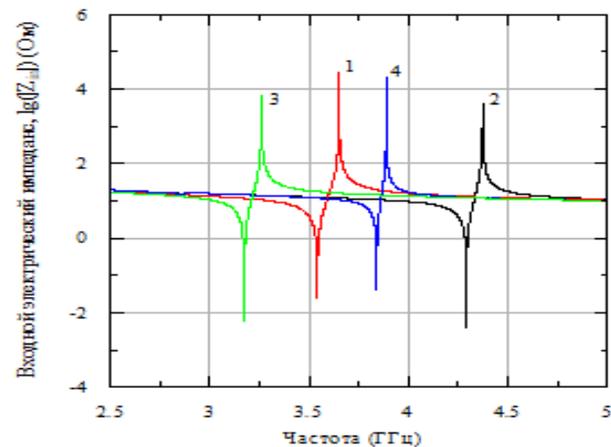


Рис. 2. Частотные зависимости входного электрического импеданса ОАВ резонаторов: 1 и 3 – резонаторы с воздушным зазором; 2 и 4 – резонаторы с брэгговским акустическим отражателем; 1 и 2 – резонаторы с верхним электродом из Al (толщина 200 нм); 3 и 4 – резонаторы с верхним электродом на основе структуры Al- Al_2O_3 (толщина Al – 200 нм; толщина Al_2O_3 – 100 нм).

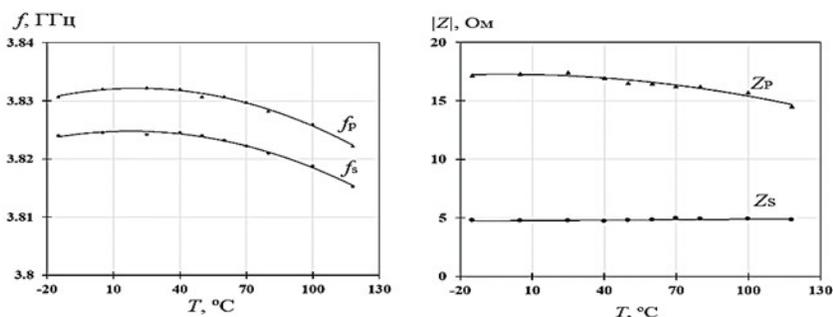
Публикации: Kozlov A.G., Torgash T.N. Analytical Study of Microelectronic Piezoelectric Resonators Based on Bulk Acoustic Waves with an Aluminum-Aluminum Oxide Film Electrode // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2022. DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803668. DOCUMENT TYPE: Scopus.

Предложена конструкция резонаторов на объемных акустических волнах (ОАВ) с верхним пленочным электродом «алюминий-оксид алюминия». Получены частотные зависимости модуля входного электрического импеданса ОАВ-резонаторов с воздушным зазором и с брэгговским акустическим отражателем. Установлено, что увеличение толщины слоя оксида алюминия в электроде приводит к уменьшению резонансных частот и интервала между ними. Толщина оксида алюминия в структуре слоев Al- Al_2O_3 верхнего электрода оказывает наибольшее влияние на частотные характеристики резонатора с брэгговским акустическим отражателем. Влияние слоя Al_2O_3 на частотные характеристики резонаторов также зависит от толщины слоя Al в структуре верхнего электрода.

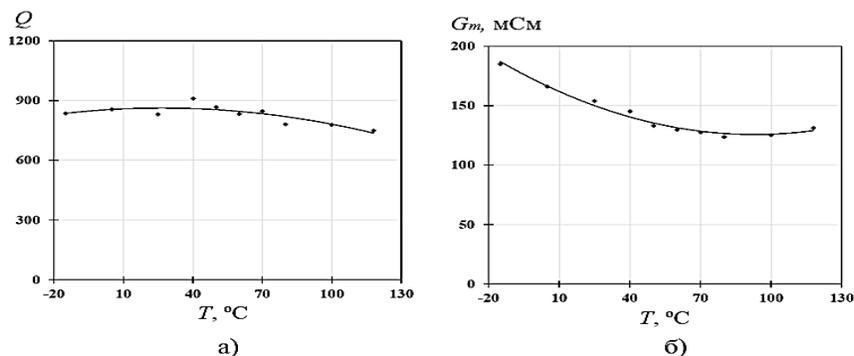
Полученные результаты являются основой для разработки методов управления частотными характеристиками микроэлектронных резонаторов на объемных акустических волнах и полосовых фильтров на их основе в процессе их проектирования и изготовления. Управление частотными характеристиками микроэлектронных ОАВ резонаторов осуществляется путем изменения толщин слоев в структуре верхнего электрода на основе Al- Al_2O_3 . Изменение толщин слоев может производиться путем электрохимического окисления слоя алюминия.



Исследование влияния температуры на частотные характеристики микроволнового ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем



Температурные зависимости электрических характеристик микроволнового ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем: а) частоты последовательного (f_s) и параллельного (f_p) резонансов; б) модуля электрического импеданса последовательного (Z_s) и параллельного (Z_p) резонансов



Температурные зависимости добротности (а) и активной проводимости (б) микроволнового ОАВ-резонатора

Публикации: 1. Torgash T.N., Kozlov A.G., Chirikov N.A., Strunin V.I. Investigation of Temperature Effect on Electrical Characteristics of Solidly Mounted Resonator // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2022. DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803482. DOCUMENT TYPE: Scopus.

2. Торгаш Т.Н., Козлов А.Г., Чириков Н.А. Исследование влияния температуры на частотные характеристики микроволнового ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем // Техника радиосвязи, 2022. Вып. 2(53). С. 111-117.

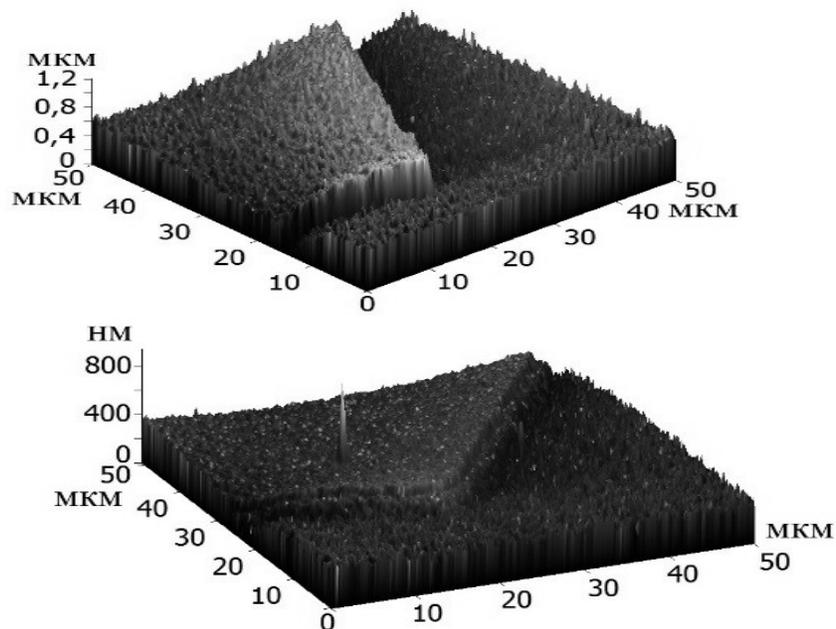
Исследовано влияние рабочей температуры на электрические характеристики микроволнового ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем, работающие на частоте 3,8 ГГц с добротностью 750–900 единиц. Показано, что увеличение температуры от -15 до 120 °С приводит к уменьшению частот последовательного и параллельного резонансов ОАВ-резонатора на 0,26 % (9 МГц), значения модуля электрического импеданса на частотах последовательного и параллельного резонанса изменяются на 5,3 и 16,6 % соответственно, величина активной проводимости – на 33 %, значение коэффициента отражения по мощности – на 27,9 %, а добротность резонатора уменьшается на 13 %.

Рассчитаны эквивалентные электрические параметры ОАВ-резонаторов, определены их температурные зависимости. Показано, что в исследуемом диапазоне температур значения статической и динамической емкостей изменяются на 7,2 и 12,4 % соответственно, а значения динамической индуктивности и сопротивления – на 12,4 и 19 % соответственно. Температурный коэффициент частоты полученных образцов равен $(-22 \dots -25) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от -15 до 120 °С.

Полученные результаты будут полезны разработчикам СВЧ-устройств на основе микроволновых резонаторов.



Влияние состояния поверхности слоев микронэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на его характеристики



АСМ-изображения образцов микронэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе пленки ZnO. Суммарная среднеквадратичная шероховатость образцов: а) № 1 - $S_q = 40$ нм; б) № 2 - $S_q = 15,1$ нм

Публикации: Торгаш Т.Н., Козлов А.Г. Влияние состояния поверхности слоев микронэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на его характеристики // Российская конференция по микронэлектронике «Школа молодых ученых»: тезисы докладов, 2022. С. 193-195.

Определены режимы магнетронного напыления, при которых полученные пленки молибдена и алюминия имеют минимальную шероховатость поверхности. Для пленок молибдена минимальное значение $S_q = 1,2$ нм, а для пленок алюминия $S_q = 3,5$ нм.

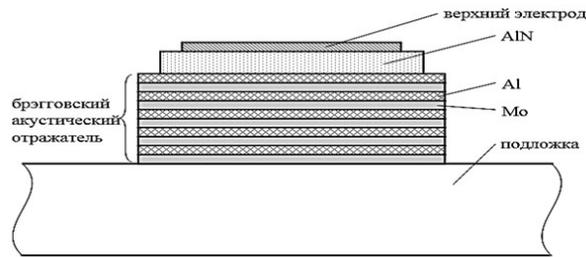
Исследовано влияние состояния поверхности пленок на электрические характеристики ОАВ-резонатора. Показано, что увеличение шероховатости поверхности пленок отрицательно влияет на добротность резонаторов.

Изготовлены ОАВ-резонаторы с брэгговским отражателем на основе пяти пар слоев молибдена и алюминия и пьезоэлектрической пленкой из оксида цинка со значением $S_q = 15$ нм, работающие на частоте $2,9 \dots 3$ ГГц с добротностью $300 \dots 350$ единиц.

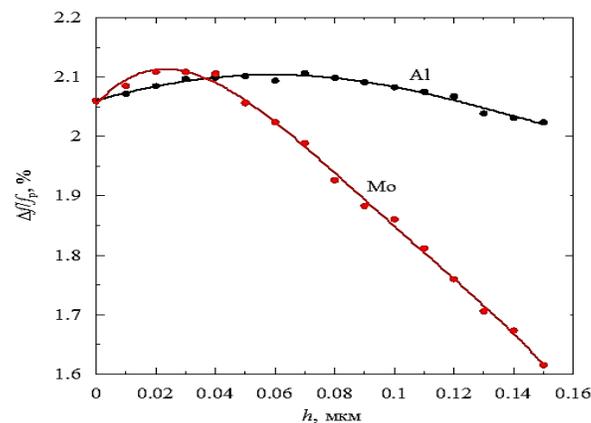
Для получения высокодобротных ОАВ-резонаторов необходима технология напыления тонкопленочных слоев с минимальной шероховатостью поверхности пленок для каждого слоя, входящего в состав резонатора.



Характеристики микроволнового ОАВ резонатора с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия и с электродами и акустическим отражателем на основе пленок алюминия и молибдена



Конструкция ОАВ-резонатора на основе слоя нитрида алюминия с электродом и брэгговским акустическим отражателем на основе слоев алюминия и молибдена



Зависимость отношения интервала между частотами параллельного (f_p) и последовательного (f_s) резонансов к частоте параллельного резонанса ОАВ-резонаторов на основе слоя нитрида алюминия с акустическим отражателем на основе слоев алюминия и молибдена от толщины верхнего электрода, изготовленного из алюминия или молибдена

Публикации: Козлов А.Г., Торгаш Т.Н. Характеристики микроволнового ОАВ резонатора с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия и с электродами и акустическим отражателем на основе пленок алюминия и молибдена // Техника радиосвязи, 2022. Вып. 3(54). С. 123-136.

Исследованы характеристики резонатора на основе нитрида алюминия с брэгговским отражателем на основе молибдена и алюминия и с верхним электродом из алюминия или молибдена. Показано, что у резонаторов с верхним электродом происходит сдвиг резонансных частот в область низких частот по сравнению с ненагруженным резонатором (идеальный резонатор без верхнего электрода). Наибольший сдвиг наблюдается у резонаторов с верхним электродом из молибдена. Установлено, что интервал между частотами последовательного и параллельного резонансов зависит от толщины и материала верхнего электрода. С увеличением толщины верхнего электрода происходит уменьшение данного интервала, причем для электрода, выполненного из молибдена это уменьшение более значительно, чем для электрода из алюминия.

В исследуемом диапазоне толщин верхнего электрода ОАВ резонатора наблюдается сложная зависимость отношения интервала между резонансными частотами к частоте параллельного резонанса от толщины электрода. При малых толщинах (менее 0,05 мкм) эти зависимости для обоих материалах электрода имеют максимум и затем уменьшаются. Уменьшение указанного отношения от значения максимума достигает 5 % для алюминиевого электрода и 25 % для молибденового электрода.



4. Разработка модели и конструкции брэгговского отражателя на основе слоев алюминия и молибдена для пьезоэлектрических структур на основе нитрида алюминия

Регрессионная статистика

Множественный R	0,917815057
R-квадрат	0,842384478
Нормированный R-квадрат	0,789752899
Стандартная ошибка	0,353758018
Наблюдения	20

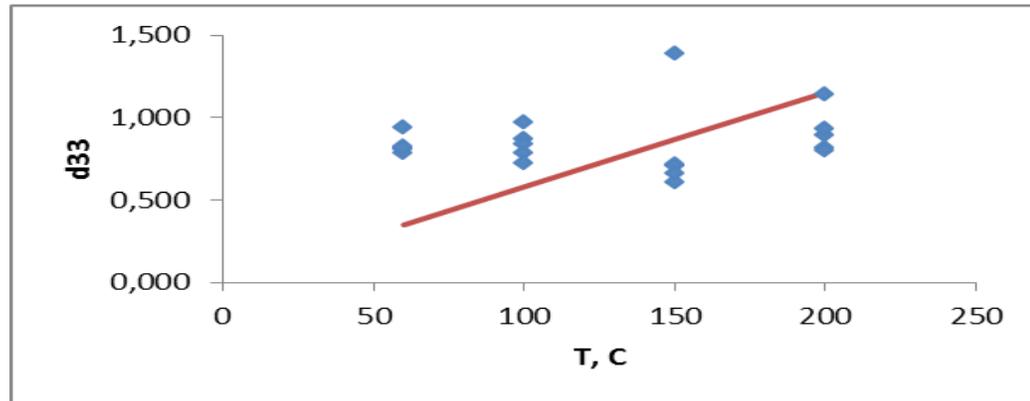


Рис. 1. Зависимость фактора d_{33} от температуры подложки.

Проведен регрессионный анализ данных внешних параметров магнетронного разряда и коэффициента электромеханической связи тонких пленок нитрида алюминия – параметр d_{33} . В данном случае от температуры подложки.

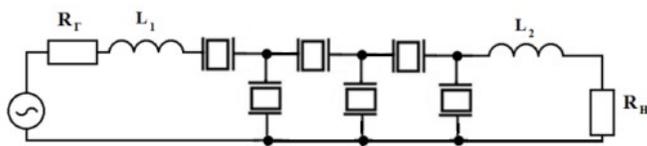
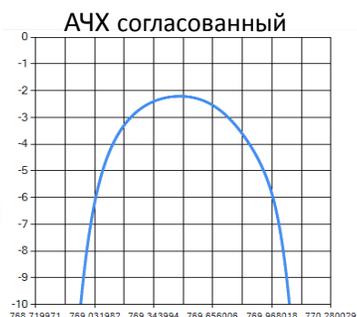
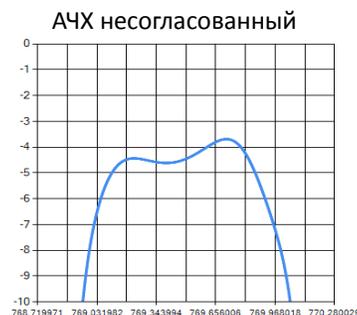
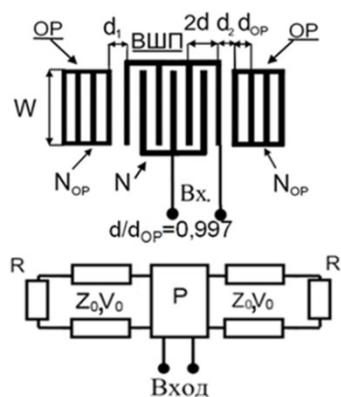
Величина R-квадрат, характеризует качество полученной регрессионной прямой. Это качество выражается степенью соответствия между исходными данными и регрессионной моделью (расчетными данными). Мера определенности всегда находится в пределах интервала $[0;1]$.

В нашем случае определенности равна 0,8423, что говорит о хорошей подгонке регрессионной прямой к исходным данным.

Вывод: можно сделать допущение, что связь между температурой подложки и d_{33} присутствует.



Развитие комплексной модели для расчета STW-фильтров с учетом согласования с нагрузками



ВП = 2 дБ,
 $\Delta f/f_0 = 0,011\%$,

КСВН=1

Модель и АЧХ фильтра на STW на частоту 769,5 МГц

Разработана комплексная модель STW-фильтров с LC-согласованием с нагрузками на основе P-матриц смешанных параметров с учетом потерь на распространение STW и потерь на проводимость электродов. Фильтры выполнялись на лестничной структуре с одноходовыми асинхронными резонаторами на срезе $YX/36^\circ+90^\circ$ кварца, когда встречно-штыревой преобразователь (ВШП) располагался между двумя отражательными решетками. Вносимые потери (ВП) таких фильтров определяются согласованием с нагрузками при максимальной добротности (Q) входящих в них резонаторов. STW-резонаторы обеспечивают максимум Q за счет оптимизации топологии. Согласование с внешними нагрузками осуществляется с помощью LC-согласования. При этом обеспечивается минимум ВП, минимум пульсаций и минимум КСВН в полосе пропускания фильтров при сохранении высокой Q резонаторов.

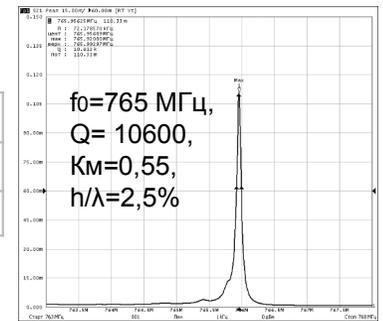
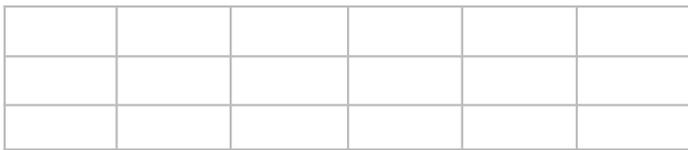
Конструктивно-топологическая оптимизация узкополосных STW-фильтров с относительной полосой пропускания $\Delta f/f_0 = 0,011\%$ в диапазоне частот 700-1000 МГц с помощью ПО с LC-согласованием позволяет снизить вносимые потери до 2 дБ, сократить амплитудные пульсации в полосе пропускания до 0,5 дБ, а КСВН приблизить к 1 на центральной частоте. Представленные исследования узкополосных STW-фильтров с малыми потерями с LC-согласованием позволяют расширить их использование как входных фильтров для аппаратуры связи, так и как элементов частотной стабилизации для маломощных генераторов.

С.А.Доберштейн, В.К. Разгоняев, Н.М. Жилин. Исследование узкополосных фильтров на STW с малыми потерями с учетом согласования с внешними нагрузками: тезисы докладов II Российской научной конференции (5-7 октября 2022 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2022. С. 171-172.

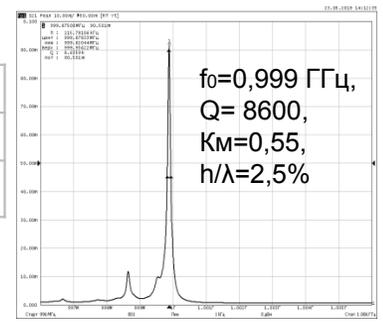
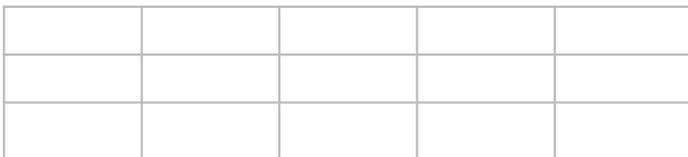


Исследования влияния технологии изготовления: толщины металлизации, коэффициента металлизации электродов в отражательных решетках на добротность STW-резонаторов

$f_0=766$ МГц



$f_0=1$ ГГц



K_M – коэффициент металлизации
 h – толщина металлизации
 λ – длина STW на f_0

Экспериментальные данные STW – резонаторов на $f_0=766$ МГц и $f_0=1$ ГГц

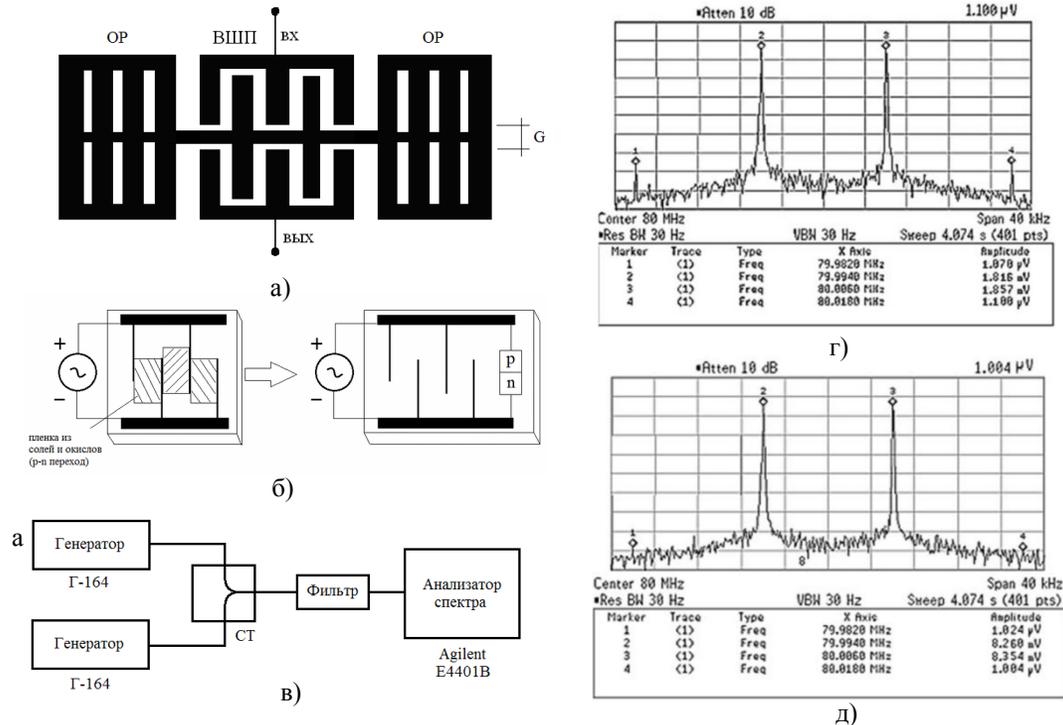
С.А.Доберштейн, И.В. Веремеев, В.К. Разгоняев. Исследование влияния технологии изготовления: толщины, коэффициента металлизации электродов в отражательных решетках и их секционирования с аperiodичностью электродов на добротность STW – резонаторов (5-7 октября 2022 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2022. С. 173-172.

Исследованы асинхронные STW-резонаторы на срезе УХ/36°+90° кварца. Резонаторы выполнялись по одноходовой схеме, когда ВШП располагался между двумя отражательными решетками (ОР). Добротность Q таких резонаторов определяется отражательной способностью ОР. Отражательная способность ОР зависит от толщины металлизации h и коэффициента металлизации K_M электродов, а также от совпадения по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП. Совпадение по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП определяется соотношением между периодами электродов ОР и ВШП. В этом случае STW-резонатор становится асинхронным. Для увеличения отражательной способности ОР проведены исследования по увеличению толщины металлизации h и коэффициента металлизации K_M электродов.

Расчеты и эксперименты показали, что уменьшение добротности в диапазоне частот > 700 МГц связано с падением отражательной способности ОР. По результатам исследований показано, что увеличение коэффициента металлизации до $K_M=0,55$, относительной толщины металлизации до $h/\lambda=2,5\%$ привело к увеличению добротности асинхронных STW-резонаторов в диапазоне частот 700-1000 МГц до значений 8600-11000 как у лучших мировых образцов. Увеличение добротности происходит за счет уменьшения рассеивания STW в объемные волны. STW-резонаторы с увеличенной добротностью позволят расширить сферу их применения для аппаратуры частотной фильтрации и частотной стабилизации.



Исследование нелинейности ПАВ-фильтров на поперечно-связанных резонаторах

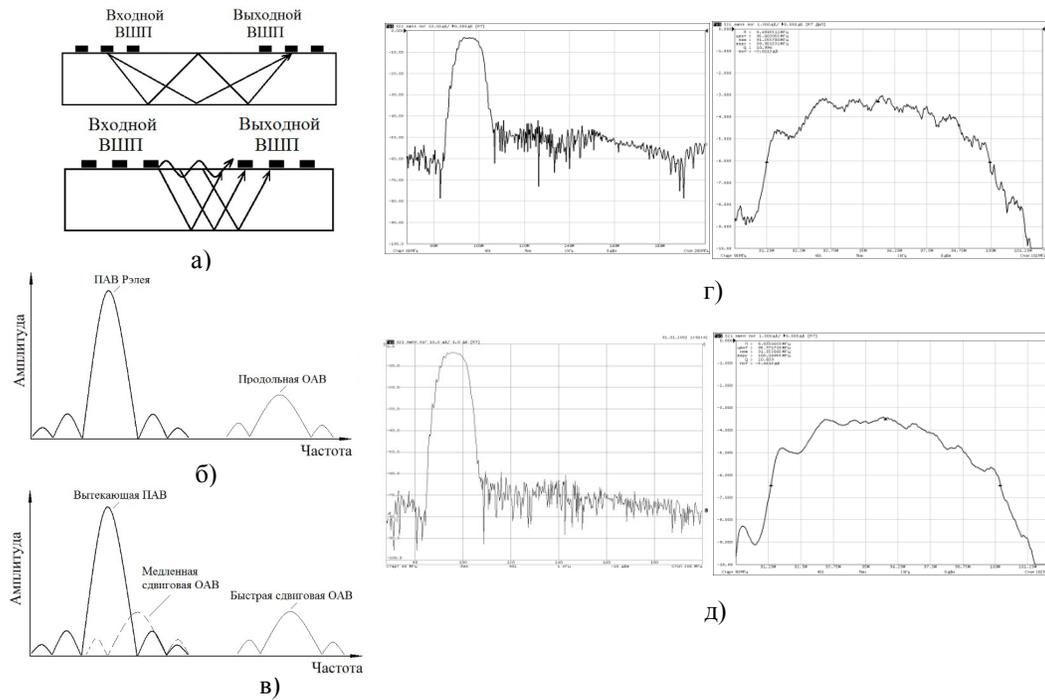


Доберштейн С.А., Косарев Б.А.. Исследование нелинейности сверхзкополосных фильтров на поперечно-связанных ПАВ-резонаторах, изготовленных жидкохимическим травлением металлизации // Техника радиосвязи 2022. Выпуск 1(52). С 100-106.

В ПАВ-фильтрах на поперечно-связанных резонаторах на кварце обеспечивается высокая линейность: уровень интермодуляционных искажений (ИИ) 3-го порядка может достигать значений > 90 дБмкВ. Однако при изготовлении фильтров на поперечно-связанных ПАВ-резонаторах методом жидкохимического травления металлизации возможно образование загрязнений в виде пленки между электродами ВШП. Эти загрязнения состоят из солей и окислов, обладающих полупроводниковыми свойствами, характерными для р-п перехода. Фактически к ВШП подключается эквивалентный полупроводниковый р-п переход - нелинейное устройство. Тогда ВШП в ПАВ-резонаторах из-за загрязнений превращается в совокупность акустического и полупроводникового устройств. При измерениях нелинейности это устройство и является причиной возникновения ИИ в фильтрах на ПАВ, уровень которых может быть около 60 дБмкВ.

Целью работы является исследование ИИ в фильтрах на поперечно-связанных ПАВ-резонаторах, изготовленных методом жидкохимического травления металлизации, и поиск способов их уменьшения.

Исследования показали, что очистка ПАВ-фильтра на поперечно-связанных резонаторах на центральную частоту 80 МГц на кварце в проточной деионизованной воде позволила улучшить уровень ИИ 3-го порядка до 78 дБмкВ за счет удаления неорганических межэлектродных загрязнений, обладающих нелинейными полупроводниковыми свойствами. Достигнутый уровень ИИ является достаточным для многих применений в трактах ПЧ современной мобильной аппаратуры связи. Промывка фильтров в проточной деионизованной воде является простым и эффективным способом улучшения линейности фильтров.



- а) Возбуждение ОАВ для вытекающей ПАВ
- б) АЧХ фильтра на ПАВ Рэлея
- в) АЧХ фильтра на вытекающей ПАВ
- г) АЧХ фильтра на срезе $YX/41^\circ \text{LiNbO}_3$ без грубой шлифовки нерабочей стороны пьезоподложки
- д) АЧХ фильтра на срезе $YX/41^\circ \text{LiNbO}_3$ после грубой шлифовки нерабочей стороны пьезоподложки

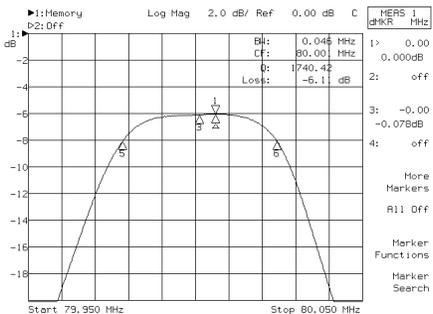
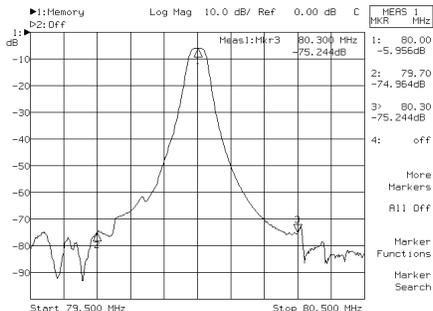
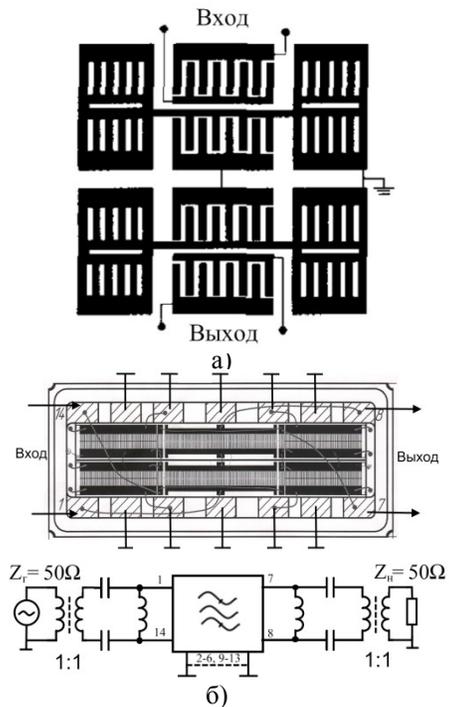
Доберштейн С.А., Косарев Б.А.. Уменьшение влияния паразитных акустических откликов в устройствах на ПАВ за счет шероховатости на нерабочей стороне пьезоподложки // Техника радиосвязи 2022. Выпуск 3(54). С 111-122.

Целью работы является исследование количественной оценки подавления паразитных акустических откликов в фильтрах на ПАВ на пьезоэлектрических материалах с различными типами волн за счет шероховатости нерабочей стороны пьезоподложки. Благодаря шероховатости нерабочей стороны пьезоподложки происходит рассеяние ОАВ и ослабление паразитных акустических откликов на выходных преобразователях ПАВ-фильтра. Для изучения влияния шероховатости нерабочей стороны пьезоподложки на уровень паразитных акустических откликов в фильтрах на ПАВ были выбраны фильтры на пьезоматериалах с различными типами волн: срез $YX/128^\circ \text{LiNbO}_3$ (ПАВ Рэлея), срез $YX/41^\circ \text{LiNbO}_3$ (вытекающая ПАВ), срез $YX/42^\circ \text{LiTaO}_3$ (вытекающая ПАВ). Увеличение шероховатости нерабочей стороны пьезоподложки достигалось ее грубой шлифовкой в смеси алмазного порошка и воды. По результатам исследований можно заключить, что создание шероховатости на нерабочей стороне пьезоподложки приводит к уменьшению пульсаций до 0,3 дБ в полосе пропускания ПАВ-фильтра и к увеличению его затухания в полосе задерживания до 55 дБ – 60 дБ для фильтров на срезах $YX/42^\circ \text{LiTaO}_3$, $YX/41^\circ \text{LiNbO}_3$. В случае использования среза $YX/128^\circ \text{LiNbO}_3$ создание шероховатости на нерабочей стороне пьезоподложки позволяет увеличить только затухание в полосе задерживания фильтра до 50 дБ.

Отмеченные закономерности соответствуют природе акустических волн, используемых в ПАВ-фильтрах в зависимости от материала пьезоподложки. После грубой шлифовки нерабочей стороны пьезоподложек ПАВ-фильтров на срезах $YX/42^\circ \text{LiTaO}_3$, $YX/41^\circ \text{LiNbO}_3$ происходит уменьшение пульсаций в полосе пропускания и увеличение затухания в полосе задерживания, за счет подавления паразитных медленной и быстрой сдвиговых ОАВ, а для ПАВ-фильтра на срезе $YX/128^\circ \text{LiNbO}_3$ происходит только увеличение затухания в полосе задерживания за счет подавления паразитной продольной ОАВ. Полученные результаты по уменьшению влияния паразитных откликов ОАВ в устройствах на ПАВ за счет шероховатости нерабочей стороны пьезоподложки позволяют улучшить неравномерность АЧХ в полосе пропускания, повысить избирательность фильтров на пьезоподложках с различными типами волн и расширить сферу применения устройств на ПАВ в различной телекоммуникационной аппаратуре.



Исследование по улучшению избирательности балансных фильтров на поперечно-связанных ПАВ-резонаторах



- а) Топология каскадного балансного ПАВ-фильтра на поперечно-связанных резонаторах
 б) Конструкция балансного ПАВ-фильтра и схема его включения
 в) АЧХ ПАВ-фильтра в согласованном балансном тракте

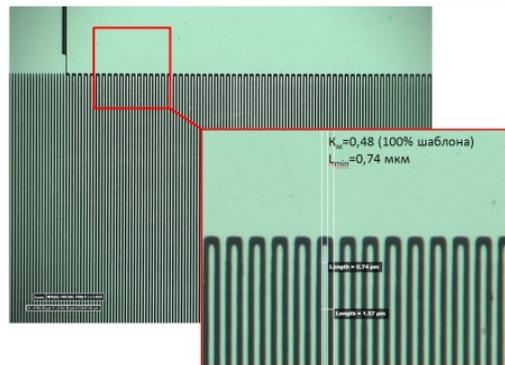
Доберштейн С.А., Веремеев И.В. Балансный фильтр на поперечно-связанных ПАВ-резонаторах с улучшенной избирательностью // Техника радиосвязи 2022. Выпуск 4(55). В печати.

В исследовании приведены результаты разработки ПЧ фильтра на ПАВ со следующей совокупностью высоких технических характеристик: малые вносимые потери (единицы дБ), малая относительная полоса пропускания ($\Delta f/f_0=0,05-0,06\%$), высокая избирательность (70-80 дБ), балансное включение и малые габариты SMD-корпуса. В основе представленного решения лежит использование поперечно-связанных резонаторов на ПАВ на кварце. Связанные резонаторы содержат входной канал со встречно-штыревым преобразователем (ВШП), размещённым между двумя отражательными решётками (ОР) с закороченными электродами и выходной канал с ВШП, с размещённым между двумя ОР. Для увеличения избирательности фильтра необходимо использовать оптимизированную двухканальную топологию с двумя разными фильтрами, которые имеют практически одинаковые АЧХ в полосе пропускания, но разные АЧХ в полосе задерживания для того, чтобы подавить паразитные отклики. Эти фильтры имеют разные апертуры. Представленный двухканальный резонаторный фильтр является балансной структурой, поскольку входной и выходной ВШП в топологии фильтра не имеют общей заземленной шины, что позволяет осуществлять симметричное подключение к нагрузкам, подавить синфазные помехи и улучшить избирательность фильтра.

Фильтр на центральную частоту 80 МГц на кварце обеспечил в согласованном балансном тракте 50 Ом вносимые потери 6 дБ, включая потери 1,16 дБ балансных трансформаторов по входу и выходу, полосу пропускания 46 кГц по уровню -2 дБ ($\Delta f/f_0=0,0575\%$), затухание в полосе задерживания >70 дБ при отстройках $\pm 0,4$ МГц от центральной частоты. На основе проведенных исследований создано базовое конструктивно-технологическое решение для разработки серийного производства сверхзаклопосных балансных резонаторных ПАВ-фильтров с $\Delta f/f_0=0,05-0,06\%$, малыми потерями (<5 дБ), улучшенной избирательностью (>70 дБ), высокой линейностью в миниатюрных SMD-корпусах, позволяющее повысить подавление помех соседних каналов и уменьшить массогабаритные характеристики тракта ПЧ современных радиостанций.

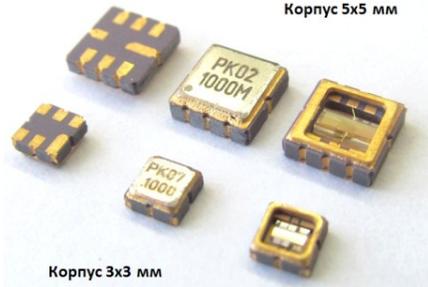


Исследование технологии контактной фотолитографии для изготовления резонаторов на STW в частотном диапазоне 1,0-1,8 ГГц

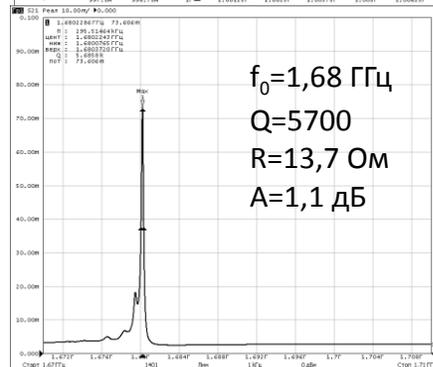
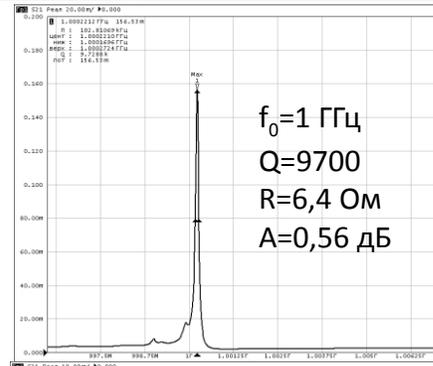


а)

Корпус 5x5 мм



б)



в)

- а) Фрагмент изготовленной топологии STW-резонатора на частоту 1,532 ГГц
 б) STW-резонаторы, упакованные в SMD-корпуса
 в) Частотные характеристики STW-резонаторов на частоты 1,0 ГГц и 1,68 ГГц

Веремеев И.В. Особенности технологии изготовления резонаторов на поверхностных поперечных волнах в частотном диапазоне 1,0-1,8 ГГц// Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXV Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 2022- С. 48-54.

В работе приведены результаты исследований технологий прямой и гибридной обратной фотолитографии, обеспечивающих возможность изготовления топологических структур с техпроцессом 0,5-1,0 мкм для STW-резонаторов в диапазоне частот 1,0-1,8 ГГц. Особенность предложенных методов – возможность расширения диапазона воспроизводимых элементов топологии с 1,0-10,0 мкм до 0,5-10,0 мкм на стандартном оборудовании контактной вакуумной УФ-фотолитографии и установках магнетронного вакуумного распыления. Уменьшение размеров минимальных элементов топологии позволило существенно расширить частотный диапазон изготавливаемых STW-резонаторов до 1,8 ГГц. Рассмотрены особенности конструкции и упаковки кристаллов STW-резонаторов в малогабаритные SMD-корпуса 5x5 мм и 3x3 мм, обеспечивающие стабильность параметров резонаторов во время изготовления и эксплуатации.

Изготовленные по разработанным технологиям STW-резонаторы в диапазоне частот 1,0-1,8 ГГц обладают высокими конкурентоспособными параметрами: добротность $Q=5600-9700$, емкостное соотношение $C_0/C_D=1000-1200$, динамическое сопротивление 10-17 Ом, упакованы в SMD корпуса 3x3 мм и могут использоваться при изготовлении миниатюрных малошумящих СВЧ-генераторов для различной телекоммуникационной аппаратуры.



ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ПРОЕКТА в 2022 году



№	Публикация	Баллы
1	Strunin V.I., Lyakhov A.A., Khudaibergenov G.Zh. Numerical study of nitrogen bulk dissociation in DC magnetron discharge in Ar+N ₂ mixture// J. Phys.: Conf. Ser. V. 2182. 2022. 012082 [DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012082]	1 (из 1,0 RCSI), Scopus
2	Baranova L., Strunin V., Baysova B. The Dependence of the surface roughness of aluminum nitride films on the processing methods when magnetron sputtering is used // Journal of Physics: Conference Series. 2270 (2022) 012005. doi: 10.1088/1742-6596/2270/1/012005	0,5 (из 1,0 RCSI), Scopus
3	Baranova L., Baysova B., Strunin V. Investigation of the structure of an aluminum nitride film for a Bragg reflector obtained by magnetron sputtering // Journal of Physics: Conference Series. 2270 (2022) 012044 doi:10.1088/1742-6596/2270/1/012044	0,5 (из 1,0 RCSI), Scopus
4	Kovivchak V.S. , Kazakov A.V., Nesov S.N. , Arbutov A.B., Trenikhin M. V. , Oks E. M. Large-scale and low-cost synthesis of porous carbon on the surface of commercial chlorinated polymers under the action of an intense electron beam of microsecond duration // Vacuum. April 2022.Volum 198, 110885/	0,83+0,83 +0,83=2,49 Q2, (из 10 WoS), Scopus
5	Torgash T. N., Chirikov N. A., Kozlov A. G., Strunin V. I. Investigation of Temperature Effect on Electrical Characteristics of Solidly Mounted Resonator// 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2022. – P. 1-4. doi: 10.1109/WECONF55058.2022.9803482.	1,0 (из 1,0 RCSI), Scopus
6	Kozlov A. G., Torgash T. N. Analytical Study of Microelectronic Piezoelectric Resonators Based on Bulk Acoustic Waves with an Aluminum-Aluminum Oxide Film Electrode // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2022. – P. 1-5. doi: 10.1109/WECONF55058.2022.9803668	1,0 (из 1,0 RCSI) Scopus
7	Доберштейн С. А., Косарев Б. А Исследование нелинейности сверхузкополосных фильтров на поперечно-связанных ПАВ-резонаторах, изготовленных жидкохимическим травлением металлизации // Техника радиосвязи. 2022. Выпуск 1 (52). С. 100–106. DOI: 10.33286/2075-8693-2022-52-100-106.	0,06 (из 0,12 ВАК)
8	Торгаш Т.Н., Козлов А.Г., Чириков Н.А. Исследование влияния температуры на частотные характеристики микроэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем // Техника радиосвязи. 2022. Выпуск 2 (53). С. 11–117.	0,06 (из 0,12 ВАК)
9	Доберштейн С.А., Косарев Б.А Уменьшение влияния паразитных акустических откликов в устройствах на ПАВ за счет шероховатости на нерабочей стороне пьезоподложки //Техника радиосвязи.2022. Вып.3.С.111–122.	0,06 (из 0,12 ВАК)
10	Козлов А.Г., Торгаш Т.Н. Характеристики микроэлектронного ОАВ-резонатора с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия и с электродами и акустическим отражателем на основе пленок алюминия и молибдена // Техника радиосвязи. 2022. Вып. 3. С. 123–136.	0,06 (из 0,12 ВАК)



ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ПРОЕКТА в 2022 году

№	Приняты в печать (выход 2022)	Баллы
1	Доберштейн С.А., Веремеев И.В. Балансный фильтр на поперечно-связанных ПАВ-резонаторах с улучшенной избирательностью // Техника радиосвязи. 2022. Вып. 4	0,06 (из 0,12ВАК)
2	Nesov S.N., Kovivchak V.S., Badamshin A.M. Formation of chemical compounds in the surface layers of titanium under the action of a high-power ion beam of nanosecond duration // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2022. V. 531. P. 74–81. DOI:10.1016 /j.nimb. 2022.09.025	0,83 Q3 (из 5 WoS) Scopus
3	Доберштейн С.А, Веремеев И.В., Разгоняев В.К. Асинхронные резонаторы на STW с высокой добротностью и уменьшенными размерами // Радиотехника	

Итого: 0,89 баллов.

ИТОГО: 6,73 + 0,89 = 7,62 баллов.



Спасибо за внимание!



Спасибо за внимание!



**С промышленностью
на одной волне**

**Итоги научно-исследовательской работы Института
радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН
в 2022 году**

И.о. директора ИРФЭ ОНЦ СО РАН к.ф.-м.н., доцент **Кривальцевич Сергей Викторович**

И.о. заместитель директора ИРФЭ ОНЦ СО РАН д.ф.-м.н., профессор **Струнин Владимир Иванович**