

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БРЭГГОВСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ОАВ-РЕЗОНАТОРОВ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Улаева Татьяна Николаевна,
Институт Радиофизики и Физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения РАН;
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,
г. Омск, Россия, tanskaya-89@mail.ru

Чириков Никита Александрович, Жилин Николай Михайлович,
Институт Радиофизики и Физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения РАН, г. Омск, Россия

Давлеткильдеев Надим Анварович,
Омский научный центр Сибирского отделения РАН;
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

Казаков Василий Иванович,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Шакин Олег Васильевич,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения;
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-11-4-13

Manuscript received 05 October 2024;
Accepted 10 November 2024

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда и Правительства
Омской области в рамках гранта
РНФ №23-12-20010

Ключевые слова: температурная зависимость,
ОАВ резонатор, объемная акустическая волна,
брэгговский отражатель, добротность,
температурный коэффициент частоты

В данной работе исследовано влияние конструктивных параметров брэгговских отражателей на температурные характеристики резонаторов, работающих на принципе распространения объемных акустических волн (ОАВ). Эти устройства используются для создания устройств частотной селекции и генерации сигналов в СВЧ диапазоне, актуальных для современных коммуникационных систем, включая 5G и Wi-Fi. Исследуемые резонаторы включали пьезоэлектрический слой из нитрида алюминия (AlN) и различные типы брэгговских отражателей, состоящих из слоев молибдена (Mo), алюминия (Al), титана (Ti) и диоксида кремния (SiO₂). При анализе были измерены параметры, такие как резонансные частоты, добротность, фазочастотные характеристики, активная проводимость, пьезоэлектрический коэффициент d₃₃ и оценены эквивалентные электрические параметры, температурный коэффициент частоты (ТКЧ) и шероховатость поверхности резонаторов.

Результаты показывают, что температурные изменения значительно влияют на резонансные частоты и добротность резонаторов. Наиболее стабильные параметры по ТКЧ (от -18 до -21 ppm/°C) и высокой добротности (Q=915) продемонстрировали резонаторы с брэгговским отражателем на основе Al-Mo-SiO₂, что делает их оптимальными для применения, требующего высокой температурной стабильности. Для резонаторов на основе Mo-Ti наблюдалась высокая добротность (Q=900) и значительный коэффициент d₃₃, что указывает на их высокую энергоэффективность, хотя их температурная зависимость оказалась выше (ТКЧ от -66 до -78 ppm/°C). Полученные данные подтверждают важность точного выбора материалов и конструкции брэгговского отражателя, а также контроля шероховатости поверхности для достижения оптимальных рабочих характеристик ОАВ-резонаторов.

Информация об авторах:

Улаева Татьяна Николаевна, к.т.н., Институт Радиофизики и Физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук; Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия, ORCID: 0000-0001-8425-6414

Чириков Никита Александрович, Институт Радиофизики и Физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук, Омск, Россия, ORCID: 0000-0003-2920-056X

Жилин Николай Михайлович, Институт Радиофизики и Физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук, Омск, Россия
Давлеткильдеев Надим Анварович, к.ф.-м.н., Омский научный центр Сибирского отделения Российской Академии наук, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия, ORCID: 0000-0002-5591-6118

Казаков Василий Иванович, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-1617-2275

Шакин Олег Васильевич, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0009-0006-1442-7429

Для цитирования:

Улаева Т.Н., Чириков Н.А., Жилин Н.М., Давлеткильдеев Н.А., Казаков В.И., Шакин О.В. Влияние конструктивных параметров брэгговских отражателей на температурные зависимости резонансных характеристик микрорезонаторных ОАВ-резонаторов с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №11. С. 4-13.

For citation:

Ulaeva T.N., Chirikov N.A., Zhilin N.M., Davletkildееv N.A., Kazakov V.I., Shakin O.V. (2024) Impact of structural parameters of bragg reflectors on the temperature dependence of resonance characteristics in microelectronic baw resonators with aluminum nitride piezoelectric layer. T-Comm, vol. 18, no.11, pp. 4-13. (in Russian)

Введение

Разработка сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств является одной из ключевых задач современной радиоэлектроники и телекоммуникаций. Такие устройства, как фильтры и генераторы, обеспечивают частотную селекцию и генерацию сигналов для систем беспроводной связи, включая технологии 5G и Wi-Fi [1-5]. Стабильная работа этих устройств при изменении температуры окружающей среды остается серьезной проблемой, поскольку температурные колебания могут вызывать смещение резонансных частот, снижение добротности и ухудшение других электрических параметров резонаторов – ключевых элементов генераторов и фильтров. Это особенно важно для систем связи, требующих высокой точности и надежности передачи данных.

Одним из перспективных решений данной проблемы является использование микрорезонаторов на основе объемных акустических волн (ОАВ). Существует два основных типа ОАВ-резонаторов: резонаторы с брэгговским отражателем (solidly mounted resonator, SMR) [6-8] или мембранные резонаторы (film bulk acoustic resonator, FBAR) [7-10]. Конструкция резонатора SMR включает пьезоэлектрический преобразователь и многослойный брэгговский отражатель, обеспечивающий эффективную акустическую изоляцию преобразователя от подложки. Это позволяет удерживать механическую энергию внутри резонатора, что способствует повышению его добротности и стабильности работы.

Брэгговский отражатель представляет собой структуру из чередующихся слоев материалов с высокими и низкими акустическими импедансами. Такая конфигурация создает условия для конструктивной интерференции отражательных волн, что усиливает отражение объемной акустической волны обратно в пьезоэлектрический преобразователь [6]. Для достижения максимальной эффективности отражения и минимизации потерь энергии требуется высокая точность изготовления слоев, включая строгий контроль толщины, однородность и минимизацию шероховатости поверхностей резонатора [8].

В ОАВ-резонаторах широко применяются тонкие пьезоэлектрические пленки нитрида алюминия [11-13] благодаря своим выдающимся свойствам, таким как высокая скорость распространения продольной объемной акустической волны, хорошая температурная стабильность, высокий коэффициент электромеханической связи, значительный пьезоэлектрический модуль и др.

При разработке брэгговских отражателей используются как металлические, так и диэлектрические пленки. Основными критериями выбора материалов являются их высокая адгезия, низкая шероховатость поверхности и значительная разница в акустических импедансах между слоями. Это позволяет улучшить отражательные свойства слоев и, соответственно, повысить эффективность резонатора [6-8, 11, 12].

Резонаторы с брэгговским отражателем обладают рядом преимуществ перед мембранными резонаторами. Они имеют высокую устойчивость к механическим и температурным воздействиям, а также к изменениям параметров окружающей среды, таких как давление и загрязнение поверхности. Кроме того, они способны работать при высоких уровнях мощности, что делает их более надежными и долговечными в условиях интенсивной эксплуатации [14].

Важным преимуществом является и возможность интеграции таких резонаторов с другими элементами функциональной электроники и интегральных схем, что способствует миниатюризации и повышению функциональности современных устройств. В условиях быстрого развития высокочастотных коммуникационных технологий, потребность в устойчивых и термостабильных резонаторах продолжает расти. Современные коммуникационные системы предъявляют высокие требования к низким потерям энергии, высокой добротности и стабильности резонансной частоты резонаторов. Это обуславливает необходимость глубокого изучения различных факторов на характеристики резонаторов и поиска путей их оптимизации.

Несмотря на значительный прогресс в области разработки ОАВ-резонаторов, температурные изменения остаются одним из ключевых факторов, негативно влияющих на их электрические характеристики. Большинство исследований сосредоточено на изучении температурных зависимостей резонансных частот и добротности. Однако влияние температурных колебаний на другие параметры, такие как фазочастотные характеристики, входной электрический импеданс, активная проводимость и коэффициент отражения по мощности, остается недостаточно изученным. Эти параметры имеют существенное значение для общей производительности устройств и могут влиять на их интеграцию в сложные системы.

В данной статье проводится комплексное исследование температурных зависимостей различных параметров ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем, что позволит глубже понять механизмы температурного воздействия и разработать методы компенсации негативных эффектов.

Для проведения исследований были выбраны ОАВ-резонаторы с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия (AlN) и алюминиевыми (Al) электродами. Устройства включают в себя три типа брэгговских отражателей с различными комбинациями материалов:

1. Брэгговский отражатель на основе трех пар слоев молибдена и алюминия и одной пары молибдена и диоксида кремния (Al-Mo-SiO₂) – рис. 1а. Данная конфигурация сочетает в себе преимущества металлических и диэлектрических слоев, обеспечивая высокую отражательную способность и возможность интеграции нескольких резонаторов в фильтровые структуры [15].

2. Брэгговский отражатель на основе шести пар молибдена-титана (Mo-Ti) – рис. 1б. Использование металлических слоев в отражателе способствует повышению механической прочности конструкции и снижению шероховатости поверхности, что положительно сказывается на параметрах резонатора.

3. Брэгговский отражатель на основе пяти пар слоев молибдена и титана и одной пары молибдена и диоксида кремния (Ti-Mo-SiO₂) – рис. 1в. Эта конструкция объединяет свойства предыдущих двух конструкций, обеспечивая оптимальный баланс между механической прочностью, отражательной способностью и возможностью интеграции в сложные схемы.

Различия в конструкциях ОАВ-резонаторов с брэгговскими отражателями (рис. 1б,в) связаны с расположением пьезоэлектрического преобразователя и слоев электродов, что влияет на акустический импеданс и эффективность отражательных свойств брэгговского отражателя.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

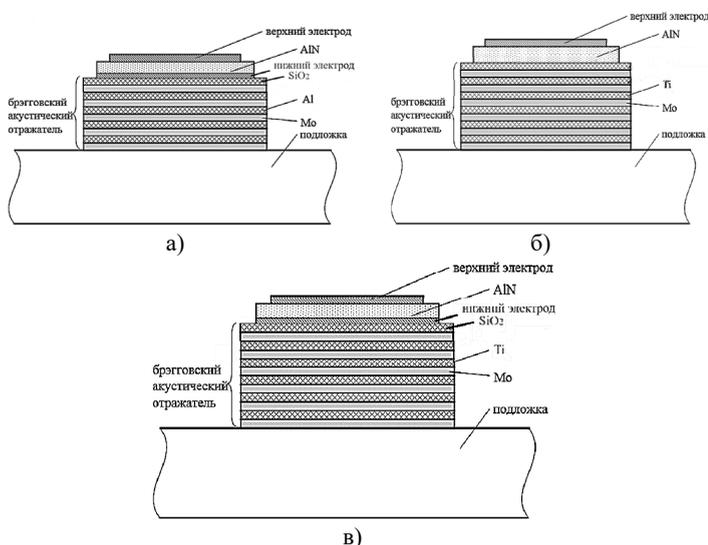


Рис. 1. Конструкции ОАВ-резонаторов с брэгговскими отражателями на основе пленок:
а – Al-Mo-SiO₂; б – Mo-Ti; в – Ti-Mo-SiO₂

Изучение представленных вариантов позволит определить оптимальные конфигурации для обеспечения хорошей температурной стабильности резонаторов.

Целью данной работы является исследование влияния теплового воздействия на резонансные характеристики микроэлектронных ОАВ-резонаторов с различными брэгговскими отражателями на основе молибдена, алюминия, титана и диоксида кремния и с активным пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия.

Методика эксперимента

Тонкопленочные структуры резонаторов формировались методом магнетронного распыления на подложки из кремния КДБ-10 и ситалла СТ50-1, закрепленные над соответствующими мишенями. Выбор данных материалов подложек обусловлен их высокой термической стабильностью, низкими потерями на затухание акустических волн и совместимостью с существующими технологиями микроэлектроники. Подложки были тщательно подготовлены перед началом процесса, включая очистку и обработку поверхности, для обеспечения высокой адгезии наносимых слоев.

Рост металлических пленок молибдена, титана и алюминия производился при давлении в камере 0,07 Па и при потоке аргона, составляющем 10 стандартных кубических сантиметров в минуту (sccm). Аргон использовался в качестве инертного рабочего газа, обеспечивая стабильное распыление материала мишени и высокую чистоту осаждаемых пленок.

Синтез диэлектрических пленок диоксида кремния осуществлялся методом реактивного магнетронного распыления кремниевой мишени высокой чистоты в среде аргон-кислородной смеси. Потоки аргона и кислорода были установлены на уровнях 5 и 6,5 sccm, соответственно. Температура подложки во время осаждения поддерживалась на уровне 300 °С.

Пьезоэлектрическая пленка нитрида алюминия выращивалась в реактивной среде аргон-азотовой смеси с потоками газов 4 и 5 sccm, соответственно. Поддержание давления в вакуумной камере на уровне 0,07 Па и температуры подложки 330 °С обеспечивало условия для формирования высоко-

качественных поликристаллических пленок AlN с преимущественной ориентацией по оси (0002).

Конфигурация слоев резонаторных структур формировалась с использованием процесса фотолитографии. Данный процесс обеспечивает воспроизводимость и точность геометрических размеров электродов и других элементов конструкции резонатора.

Методика процесса напыления резонансных структур подробно описана авторами в работе [16].

После изготовления образцы резонаторов были подвергнуты серии испытаний для оценки их электрических характеристик и анализа влияния температуры на их работу. Сформированные образцы помещались на платформу с возможностью контроля температуры в реальном времени. Основные электрические параметры резонаторов измерялись с использованием векторного анализатора электрических цепей E5071C производства Agilent Technologies. Этот прибор позволяет проводить измерения комплексного импеданса и параметров S-матрицы в широком диапазоне частот с высокой точностью, что необходимо для детального анализа резонансных свойств ОАВ-резонаторов.

Для обеспечения контролируемого нагрева образцов использовался технический фен ФЭ-2000ЭД, оснащенный функцией стабилизации температуры исходящего воздуха. Фен был установлен на расстоянии 5 см от конструкции, что обеспечивало равномерный нагрев и минимизировало влияние воздушных потоков на измерения. Температура нагрева контролировалась в диапазоне от комнатной температуры до 110 °С с шагом увеличения 10...20°С. Измерения электрических параметров проводились как во время нагрева, так и в процессе естественного охлаждения образцов.

Параметры поверхности и качество пленок являются критическими факторами, влияющими на работу ОАВ-резонаторов. Неровности и дефекты на поверхности пленок могут вызывать рассеяние акустических волн, снижать добротность резонатора и приводить к нестабильности его характеристик. Для исследования морфологии поверхности и оценки ее параметров использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ). АСМ позволяет получать топографические изображения поверхности с нанометровым разрешением и измерять среднеквадратичное отклонение высоты неровностей поверхности (S_q). Эти данные являются важными для понимания влияния поверхностных свойств на акустические и электрические характеристики резонатора. Измерения проводились с использованием программного обеспечения микроскопа.

Контроль качества пьезоэлектрических пленок нитрида алюминия осуществлялся методом сканирующей силовой микроскопии пьезоотклика. Указанный метод позволяет исследовать локальные пьезоэлектрические свойства материала. Детальное описание методики и ее применения для анализа пленок AlN представлено в работе [17].

Полученные экспериментальные данные послужили основой для детального анализа и определения эквивалентных электрических параметров резонаторов по модели Баттерворта-ван Дайка. Эта модель широко используется для описания поведения пьезоэлектрических резонаторов и позволяет связать их механические и электрические свойства. В соответствии с моделью, резонатор представляется эквивалентной электрической цепью, состоящей из следующих компонентов:

– статическая емкость (C_0) – отражает емкость резонатора в отсутствии механических колебаний и определяется геометрическими размерами (площадью верхнего электрода S_{cl}) и диэлектрическими свойствами материалов;

– динамическая емкость (C_m) и динамическая индуктивность (L_m) – связаны с механическими колебаниями в резонаторе и описывают энергию, запасаемую в виде механических деформаций и кинетической энергии;

– динамическое сопротивление (R_m) – характеризует потери энергии в резонаторе, включая внутреннее трение в материалах и потери на излучение акустических волн. Расчеты эквивалентных параметров проводились согласно формулам, изложенным авторами в [15], с использованием экспериментальными измерениями импеданса и параметров S-матрицы.

Особое внимание уделялось исследованию температурных зависимостей частот последовательного (f_s) и параллельного (f_p) резонансов, фазочастотных характеристик, входного электрического импеданса на частотах последовательного (Z_s) и параллельного (Z_p) резонансов, добротности (Q), активной проводимости на частоте последовательного резонанса (G_{max}) и коэффициента отражения по мощности на частоте последовательного резонанса (S_{11min}).

Результаты эксперимента и их обсуждение

В данной работе исследовались экспериментальные образцы микроэлектронных ОАВ-резонаторов с тремя брэгговскими отражателями. В нормальных условиях (температура 24°C, относительная влажность 63%) эти резонаторы имели параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Измеренные электрические параметры экспериментальных образцов ОАВ-резонаторов

Брэгговский отражатель	S_{cl} , мм ²	Электрические параметры резонатора									
		f_s , ГГц	f_p , ГГц	Δf , МГц	Z_s , Ом	Z_p , Ом	Q	G_{max} , мСм	S_{11min} , дБ	C_0 , пФ	
3 пары Mo-Al 1 пара Mo-SiO ₂	0,020	3,82425	3,83225	8,0	4,74	17,4	915,0	154,0	-4,0	5,40	
6 пар Mo-Ti	0,0081	4,28141	4,29797	16,6	3,1	98,7	900,1	322,5	-15,2	1,65	
5 пар Mo-Ti 1 пара Mo-SiO ₂	0,0081	4,5916	4,6176	26,0	9,2	31,9	251,0	80,1	-7,8	2,21	

Измеренные параметры образцов ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем Al-Mo-SiO₂ представлены в работах [18, 19]. Образцы функционируют в диапазоне частот 3,7-3,9 ГГц, демонстрируя резонансный промежуток Δf порядка 8 МГц и высокую добротность Q в пределах 750-950.

Статическая емкость резонаторов составляет 5,4 пФ, активная проводимость на частоте последовательного резонанса достигает 150-160 мСм, а коэффициент отражения по мощности на этой частоте равен -4 дБ. Модули входного электрического импеданса на частотах последовательного и параллельного резонансов составляет 4-6 Ом и 17-20 Ом, соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные резонаторы обладают добротностью, значительно превосходящей аналогичные устройства, описанные в работах

[20-22]. Что является критически важным при разработке высокоэффективных устройств частотной селекции и генерации сигналов в СВЧ диапазоне. Однако сравнительно узкий резонансный промежуток ограничивает возможности использования этих резонаторов при конструировании полосовых фильтров, требующих более широкую полосу пропускания.

Образцы резонаторов с брэгговским отражателем Mo-Ti работают на частотах от 4,2 до 4,3 ГГц и имеют высокую добротность в диапазоне 900-1200 [23]. Увеличенный резонансный промежуток резонаторов и низкий коэффициент отражения по мощности (-15,2 дБ) могут указывать на их потенциал для применения в устройствах, требующих более широкополосных характеристик.

Образцы резонаторов с отражателем на основе многослойных пленок Mo-Ti-SiO₂ показали меньшую добротность по сравнению с предыдущими образцами. Это можно объяснить несоответствием резонансных частот пьезоэлектрического преобразователя и брэгговского отражателя, поскольку наблюдается смещение рабочей частоты резонатора в область более высоких частот. Тем не менее, данные резонаторы обладают самым широким резонансным промежуток среди рассмотренных образцов.

Температурные зависимости электрических параметров ОАВ-резонаторов с различными брэгговскими отражателями представлены на рисунках 2-6. На рисунке 2 показано, что повышение температуры приводит к смещению последовательной частоты резонаторов в область более низких значений.

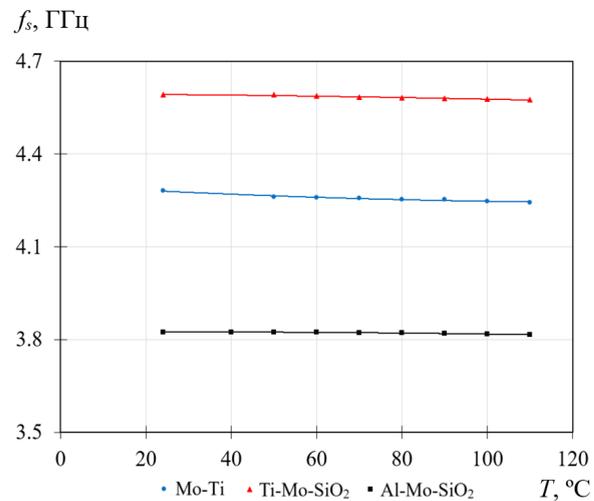


Рис. 2. Температурные зависимости последовательной частоты (f_s) резонаторов с тремя брэгговскими отражателями

Аналогичные зависимости наблюдаются для частоты параллельного резонанса. Максимальное изменение частоты отмечено для резонаторов с брэгговским отражателем Mo-Ti, что указывает на их повышенную чувствительность к температурным воздействиям.

Рисунок 3 иллюстрирует изменение характера частотной зависимости модуля входного электрического импеданса при увеличении рабочей температуры.

С ростом температуры происходит не только смещение резонансных частот, но и изменение формы резонансных кривых, что влияет на добротность и другие важные параметры резонатора.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

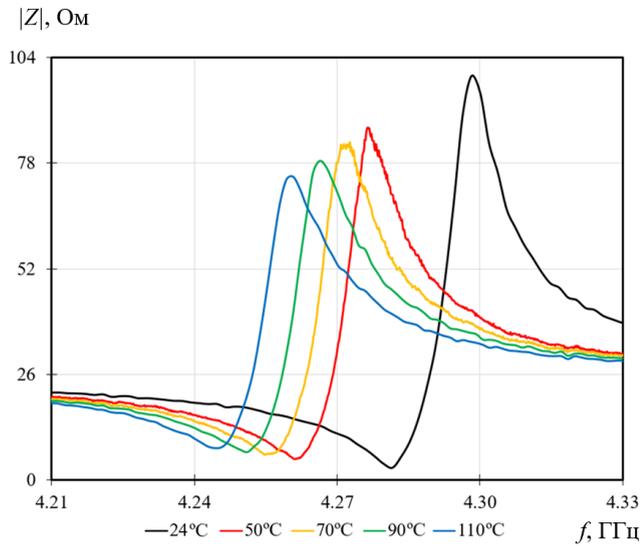


Рис. 3. Частотные зависимости модуля входного электрического импеданса резонатора с брэгговским отражателем Mo-Ti при различных температурах

На рисунке 4 представлены типичные фазочастотные характеристики ОАВ-резонатора при различных рабочих температурах. Анализ рисунка 4 показывает, что с увеличением температуры происходит смещение фазочастотных характеристик в область более низких частот, при этом типичная форма отклика сохраняется.

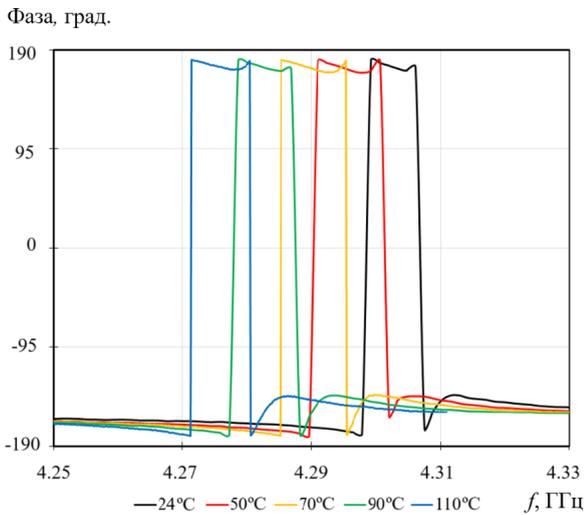


Рис. 4. Фазовый отклик резонатора с брэгговским отражателем Mo-Ti при различных температурах

Такая закономерность отмечается для всех типов резонаторов, что свидетельствует о систематическом влиянии температурных изменений на их фазовые свойства. Температурные изменения оказывают значительное влияние на добротность ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем Mo-Ti, что наглядно показано на рисунке 5. Наблюдается снижение добротности резонаторов в 1,7 раза при повышении температуры от 24 до 110 °С. Для резонаторов с брэгговским отражателем Al-Mo-SiO₂ и Ti-Mo-SiO₂ наблюдается уменьшение добротности на 19%.

Наибольшее существенное воздействие температуры на активную проводимость отмечено для резонатора с брэгговским отражателем Mo-Ti (рис. 6).

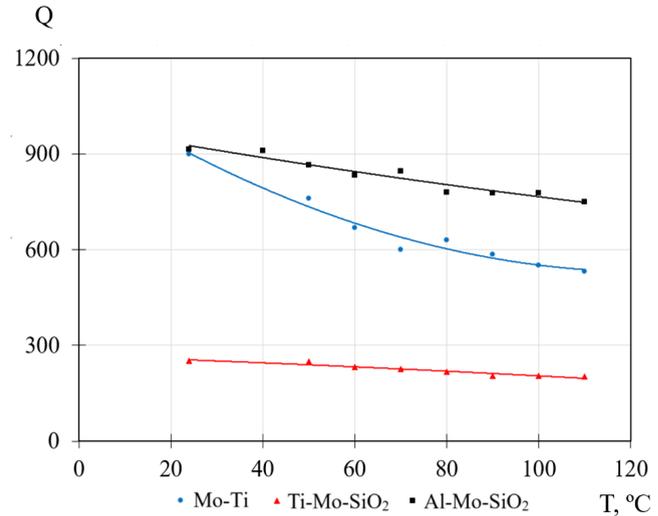


Рис. 5. Температурные зависимости добротности ОАВ-резонаторов с брэгговскими отражателями

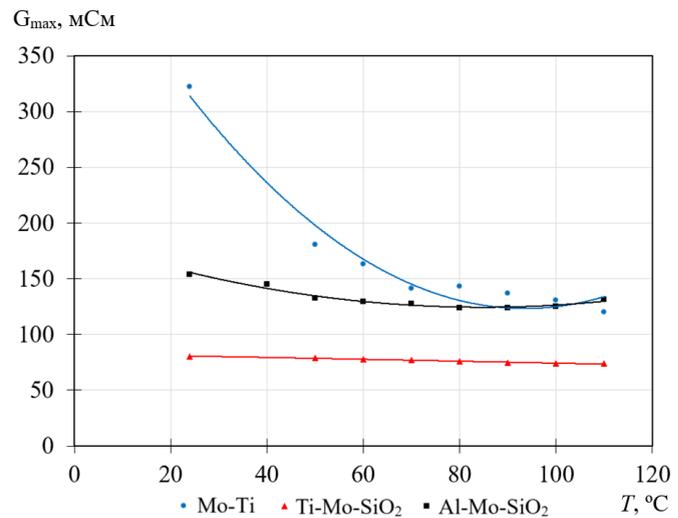


Рис. 6. Температурные зависимости активной проводимости ОАВ-резонаторов с брэгговскими отражателями

Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) для ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем Mo-Ti был определен в диапазоне от -66 до -78 ppm/°C при температурах от 24 до 110 °С, что значительно отличается от известных данных для тонких пленок нитрида алюминия [21, 24]. Это свидетельствует о существенном влиянии металлического брэгговского отражателя на ТКЧ ОАВ-резонаторов. В ходе исследования было установлено, что для всех типов резонаторов отклонение коэффициента отражения по мощности составляет менее 10 %.

Для ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем Ti-Mo-SiO₂ величина ТКЧ составляет от -38 до -40 ppm/°C в том же температурном диапазоне. Наиболее оптимальные значения ТКЧ достигнуты для резонаторов с брэгговским отражателем Al-Mo-SiO₂, где они варьируются от -18 до -21 ppm/°C.

Полученные результаты для образцов ОАВ-резонаторов с диэлектрическим слоем демонстрируют улучшенные значения ТКЧ, что может быть использовано как стратегическая мера повышения температурной стабильности ОАВ-резонаторов. Такое решение способно существенно улучшить эксплуатационные характеристики резонаторов при работе в условиях изменяющихся температурных режимов. Данные выводы согласуются с результатами, представленными в работе [25].

Влияние рабочей температуры на эквивалентные электрические параметры резонатора с различными брэгговскими отражателями представлены на рисунке 7.

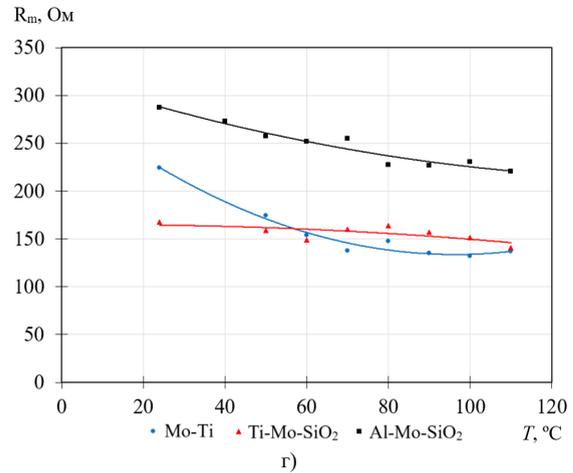
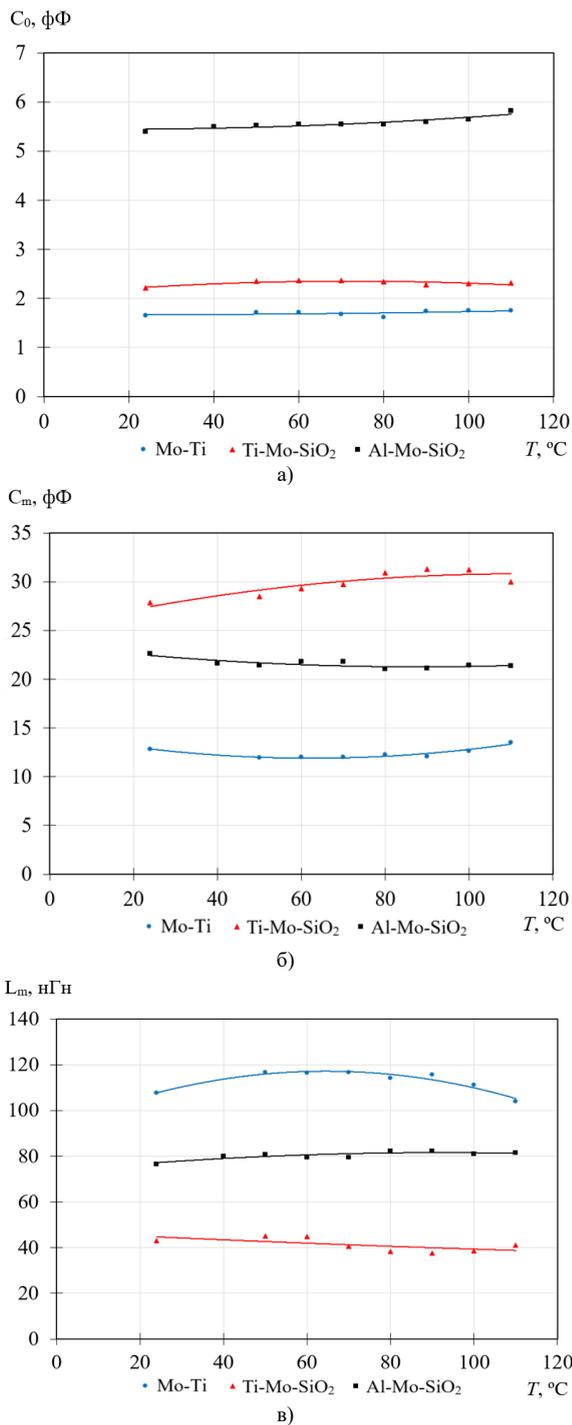


Рис. 7. Температурные зависимости: а) статической емкости; б) динамической емкости; в) динамической индуктивности; г) динамического сопротивления резонаторов с брэгговскими отражателями

В исследуемом температурном диапазоне значения статической емкости (рис. 7а) увеличиваются на 7%, что свидетельствует о влиянии температуры на электрические характеристики материала.

Температурные зависимости динамической емкости (рис. 7б) и индуктивности (рис. 7в) демонстрируют незначительные изменения, причем их значения в среднем увеличиваются на 13,5% в исследуемом температурном диапазоне. Это говорит о влиянии температуры на механические характеристики резонатора.

Наибольшие изменения испытывает динамическое сопротивление, что указывает на значительное влияние тепловых эффектов, происходящих в электродах и брэгговском отражателе.

При повышении рабочей температуры с 24 до 110 °С динамическое сопротивление уменьшается в 1,6 раза для резонаторов с брэгговским отражателем типа Mo-Ti (рис. 7г). Напротив, для резонаторов с брэгговским отражателем типа Mo-Ti-SiO₂ наблюдается уменьшение динамического сопротивления на 23%, что показывает различие в температурной чувствительности конструкций резонаторов.

Для более детального анализа характеристик ОАВ-резонаторов были проведены дополнительные измерения шероховатости поверхности резонатора и пьезоэлектрического коэффициента d_{33} каждого типа резонатора. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 представляет экспериментальные параметры резонаторов с брэгговскими отражателями различных конструкций. В каждом типе брэгговского отражателя используются разные материалы и комбинации слоев, что позволяет проанализировать влияние конструктивных особенностей на характеристики резонаторов.

Основные параметры, показанные в таблице 2, включают площадь верхнего электрода (S_{el}), шероховатость поверхности (S_q), пьезоэлектрический коэффициент (d_{33}), температурный коэффициент частоты (ТКЧ), резонансный промежуток (Δf), коэффициент электромеханической связи (k_r^2) и добротность (Q) резонатора.

Таблица 2

Параметры экспериментальных образцов ОАВ-резонаторов

Брэгговский отражатель	S_{ej} , мм ²	Параметры резонатора					
		S_q , нм	d_{33} , пм/В	ТКЧ, ppm/°C	Δf , МГц	k_t^2 , %	Q
3 пары Mo-Al 1 пара Mo-SiO ₂	0,020	20,70	1,04	18,9	8,0	0,52	915,0
6 пар Mo-Ti	0,0081	5,20	1,41	76,2	16,6	0,95	900,1
5 пар Mo-Ti 1 пара Mo-SiO ₂	0,0081	9,85	0,99	38,6	26,0	1,53	251,0

Из таблицы 2 можно сделать следующие выводы:

1) Резонатор с брэгговским отражателем Al-Mo-SiO₂ показывает наибольшую добротность (Q = 915) несмотря на наибольшее значение шероховатости (20,7 нм). Также он имеет наилучшее значение ТКЧ (18,9 ppm/°C), но достаточно низкий коэффициент электромеханической связи (0,52 %) и узкий резонансный промежуток, что может ограничивать его применение в системах, требующих высокой чувствительности.

2) Резонатор с брэгговским отражателем на основе Mo-Ti демонстрирует улучшенный пьезоэлектрический коэффициент d_{33} (1,41 пм/В), высокую добротность (900,1) и средний коэффициент электромеханической связи (0,95 %), что указывает на его высокую эффективность преобразования энергии. Однако он имеет высокое значение ТКЧ (76,2 ppm/°C), что может негативно сказаться на его температурной стабильности.

3) Резонатор с брэгговским отражателем Ti-Mo-SiO₂ показывает высокий коэффициент электромеханической связи (1,53%) и широкий резонансный промежуток ($\Delta f = 26,0$ МГц), что делает его привлекательным для применения в полосовых фильтрах. Однако его добротность значительно ниже (Q = 251) и значение ТКЧ равно 38,6 ppm/°C.

Таким образом, каждый тип брэгговского отражателя имеет свои преимущества и ограничения в зависимости от применения. Резонаторы с Mo-Ti показывают наибольшую эффективность преобразования энергии, тогда как добавление диэлектрического слоя SiO₂ приводит к расширению резонансного промежутка и улучшению температурной стабильности, что полезно для фильтров.

Показано, что шероховатость поверхности имеет прямое влияние на потери в резонаторе, так как более гладкая поверхность способствует лучшему сохранению акустической энергии, повышая добротность резонатора. На основании представленных данных можно сделать предположение, что помимо шероховатости поверхности резонаторов на добротность также влияет теплопроводность материалов, из которых он изготавливается.

Следовательно, параметры, представленные в таблице 2, позволяют глубже понять, как конструктивные и технологические аспекты (шероховатость и пьезоэлектрический коэффициент) влияют на электрические и механические характеристики ОАВ-резонаторов.

Полученные результаты подтверждают существенное влияние температуры на добротность и резонансные частоты

ОАВ-резонаторов, что согласуется с предыдущими исследованиями [24]. Кроме того, выявленные закономерности в изменении эквивалентных электрических параметров предоставляют ценные данные для оптимизации конструкции и материалов ОАВ-резонатора с целью повышения стабильности и эффективности работы устройств в условиях повышенных температур.

Заключение

В данной работе детально изучены электрические параметры и температурные зависимости резонансных характеристик экспериментальных образцов микроэлектронных ОАВ-резонаторов с различными брэгговскими отражателями. Исследование показало, что конструкция брэгговского отражателя оказывает существенное влияние на температурный коэффициент частоты (ТКЧ), добротность, резонансный промежуток и другие ключевые параметры резонаторов, что имеет критическое значение для их стабильности и производительности при эксплуатации в условиях изменяющихся температур. Ниже приведены основные выводы:

1. Резонатор с брэгговским отражателем Ti-Mo-SiO₂ показывает самый широкий резонансный промежуток (26,0 МГц) и высокий коэффициент электромеханической связи (1,53 %), что делает его перспективным для применения в полосовых фильтрах. Однако он имеет относительно низкую добротность (Q=251) и ТКЧ на уровне 38,6 ppm/°C, что может потребовать дополнительных мер для повышения стабильности.

2. Показано, что шероховатость поверхности влияет на потери в резонаторе. Образцы с более гладкой поверхностью (меньшая шероховатость) демонстрируют более высокую добротность, так как снижается рассеяние акустической энергии. Это подчеркивает важность строгого контроля за параметрами поверхности слоев брэгговского отражателя при изготовлении.

3. Наименьший ТКЧ был зафиксирован для резонатора с отражателем Al-Mo-SiO₂ (18,9 ppm/°C), что обеспечивает наилучшую температурную стабильность. Указанный резонатор также имеет наибольшую добротность (Q=915) при наибольшем значении шероховатости поверхности (20,7 нм), что говорит о потенциальной применимости данного типа резонатора в системах, где требуется стабильность частоты и высокая добротность.

4. Значение коэффициента d_{33} определяет эффективность преобразования энергии в резонаторе. Резонатор с брэгговским отражателем Mo-Ti имеет самый высокий коэффициент d_{33} (1,41 пм/В), что свидетельствует о его высокой эффективности. Это делает данный тип резонатора перспективным для применения в устройствах, требующих высокой чувствительности и эффективного преобразования энергии.

5. Проведенные температурные исследования показали значительные изменения параметров при повышении температуры до 110 °C. Добротность резонаторов с брэгговским отражателем Mo-Ti уменьшается в 1,7 раза, что указывает на необходимость учета температурных факторов при проектировании. Включение диэлектрического слоя из диоксида кремния в брэгговский отражатель (Al-Mo-SiO₂ и Ti-Mo-SiO₂) помогает снизить температурную зависимость параметров, что делает такие конструкции более стабильными при изменении температуры.

6. Полученные результаты показывают, что для создания высокостабильных и эффективных ОАВ-резонаторов в СВЧ диапазоне необходимо учитывать влияние конструкции брэгговского отражателя, шероховатости поверхности и пьезоэлектрического коэффициента на электрические характеристики и температурные зависимости резонатора. Оптимизация этих параметров может значительно улучшить работу резонаторов в условиях изменяющихся температур и повысить их надежность в современных телекоммуникационных и электронных системах, таких как 5G и Wi-Fi.

Литература

1. Yang Y., Dejous C., Hallil H. Trends and Applications of Surface and Bulk Acoustic Wave Devices: A Review // *Micromachines*. 2023. Vol. 14 (1). No. 43, pp. 1-21.
2. Startt J. et al. Unlocking AlN Piezoelectric Performance with Earth-Abundant Dopants // *Advanced Electronic Materials*. 2023. Vol. 9. No. 2201187, pp. 1- .
3. Zou Y. et al. Aluminum scandium nitride thin-film bulk acoustic resonators for 5G wideband applications // *Microsystems&Nanoengineering*. 2022. Vol. 8. No. 124, pp. 1-7.
4. Zha X.H. et al. Surface and bulk acoustic wave resonators based on aluminum nitride for bandpass filters // *AAPPS Bulletin*. 2024. Vol. 34. No. 14, pp. -15.
5. Dou W., Zhou C., Qin R., Yang Y., Guo H., Mu Z., Yu W. Super-High-Frequency Bulk Acoustic Resonators Based on Aluminum Scandium Nitride for Wideband Applications // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13(20). No. 2737.
6. Tag A. et al. Influence of temperature distribution on behavior, modeling, and reliability of BAW resonators // *2014 IEEE International Reliability Physics Symposium, Waikoloa, HI, USA*. 2014. pp. 5C.5.1-5C.5.7.
7. Liang X. et al. Mechanically Driven Solidly Mounted Resonator-Based Nanoelectromechanical Systems Magnetolectric Antennas // *Advanced Engineering Materials*. 2023. Vol. 25. No. 2300425, pp. 1-11.
8. Chung C.Y., Chen Y.C., Chen Y.C., Kao K.S., Chang Y.C. Fabrication of a 3.5-GHz Solidly Mounted Resonator by Using an AlScN Piezoelectric Thin Film // *Coatings*. 2021. Vol. 11. No. 10:1151, pp. 1-12.
9. Joshi P.K., Latwe K.R., Hasamnis M.A. Analysis and enhancement of Q-factor in thin-film bulk acoustic wave resonator (FBAR) // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol.2273. No. 012010, pp. 1-9.
10. Song Y. et al. Thermal Conductivity of Aluminum Scandium Nitride for 5G Mobile Applications and Beyond // *Functional inorganic materials and devices*. 2021. Vol. 13. Iss. 16, pp. 19031-19041.
11. Sundarapandian B. et al. Influence of growth temperature on the properties of aluminum nitride thin films prepared by magnetron sputter epitaxy // *Journal of Applied Physics*. 2023. Vol. 134. No. 185107, pp. 1-10.
12. Mirea T., Olivares J., Clement M., Sangrador J. AlN-based solidly mounted resonators at 400°C: in-situ performance monitoring // *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, UK*. 2019, pp. 1700-1702.
13. Feng G.H. et al. Investigation of Mo Doping Effects on the Properties of AlN-Based Piezoelectric Films Using a Sputtering Technique // *2022 ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2022. Vol. 11. No. 12, Article 123005.
14. Igeta H., Totsuka M., Suzuki M., Yanagitani T. Temperature Characteristics of ScAlN/SiO₂ BAW Resonators // *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, Japan*. 2018, pp. 1-4.
15. Танская Т.Н., Козлов А.Г., Зима В.Н. Исследование влияния диэлектрического слоя в брэгговском отражателе на характеристики тонкопленочного ОАВ-резонатора // *Техника радиосвязи*. 2016. Вып. 4 (31). С. 110-118.
16. Zhilin N.M., Ulaeva T.N., Chirikov N.A., Kozlov A.G. An Influence of an Electrode Configuration on Electrical Parameters of a Microelectronic Bulk Acoustic Wave Resonator with a Bragg Reflector // *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation*. 2024, pp. 1-4.
17. Mironova M.I. et al. Characterization of Structure, Morphology, Optical and Electrical Properties of AlN-Al-V Multilayer Thin Films Fabricated by Reactive DC Magnetron Sputtering // *Coatings*. 2023. Vol. 13. No. 223, pp. 1-22.
18. 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), St. Petersburg, Russian Federation*. 2022, pp. 1-4.
19. Торгаш Т.Н., Козлов А.Г., Чуриков Н.А. Исследование влияния температуры на частотные характеристики микроэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем // *Техника радиосвязи*. 2022. Вып. 2 (53). С. 111-117.
20. Munir J. et al. Effects of compensating the temperature coefficient of frequency with the acoustic reflector layers on the overall performance of solidly mounted resonators // *Ultrasonics*. 2017. Vol. 74, pp. 153-160.
21. Chen D., Xu Y., Wang J., Zhang L., Wang X., Liang M. The AlN based solidly mounted resonators consisted of the all-metal conductive acoustic Bragg reflectors // *Vacuum*. 2010. Vol. 85, pp. 302-306.
22. Wei C.L. et al. Solidly mounted resonators consisting of a molybdenum and titanium Bragg reflector // *Applied Physics A*. 2008. Vol. 90, pp. 501-506.
23. Ulaeva T.N., Zhilin N.M., Chirikov N.A., Strunin V.I. A Study of a Temperature Effect on Characteristics of a Solidly Mounted Resonator Based on AlN, Al, Mo and Ti Thin Films // *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation*. 2024, pp. 1-5.
24. Ha T.D. Effects of material and dimension on TCF, frequency, and Q of radial contour mode AlN-on-Si MEMS resonators // *Journal of Electronic Science and Technology*. 2021. Vol. 19. No. 100120, pp. 1-13.
25. Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И. Тонкопленочные акустоэлектронные компоненты СВЧ-диапазона // *Компоненты и технологии*. 2014. № 5. С. 8-12.

IMPACT OF STRUCTURAL PARAMETERS OF BRAGG REFLECTORS ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF RESONANCE CHARACTERISTICS IN MICROELECTRONIC BAW RESONATORS WITH ALUMINUM NITRIDE PIEZOELECTRIC LAYER

Tatiana N. Ulaeva, *Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia, tanskaya-89@mail.ru*

Nikita A. Chirikov, *Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Omsk, Russia*

Nikolai M. Zhilin, *Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Omsk, Russia*

Nadim A. Davletkildiev, *Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia*

Vasily I. Kazakov, *Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia*

Oleg V. Shakin, *Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia*

Abstract

This study investigates the impact of Bragg reflector design parameters on the temperature characteristics of resonators operating on the principle of bulk acoustic wave (BAW) propagation. These devices are essential for frequency selection and signal generation in the gigahertz range, which is crucial for modern communication systems such as 5G and Wi-Fi. The resonators under study featured an aluminum nitride (AlN) piezoelectric layer and various types of Bragg reflectors composed of molybdenum (Mo), aluminum (Al), titanium (Ti), and silicon dioxide (SiO₂) layers. Key parameters measured included resonance frequencies, quality factor (Q), phase-frequency characteristics, active conductance, piezoelectric coefficient d₃₃, as well as equivalent electrical parameters, temperature coefficient of frequency (TCF), and surface roughness. The findings reveal that temperature variations significantly affect resonance frequencies and quality factors of the resonators. The most stable TCF values (from -18 to -21 ppm/°C) and high quality factor (Q = 915) were achieved with Al-Mo-SiO₂ Bragg reflectors, making them ideal for applications requiring high-temperature stability. Resonators with Mo-Ti reflectors demonstrated high quality factor (Q = 900) and an impressive d₃₃ coefficient, indicating high energy efficiency, though they exhibited greater temperature sensitivity (TCF from -66 to -78 ppm/°C). These results underscore the importance of careful material selection, precise Bragg reflector design, and surface roughness control to achieve optimal performance characteristics in BAW resonators.

Keywords: temperature dependence, BAW resonator, bulk acoustic wave, Bragg reflector, quality factor, temperature coefficient of frequency.

References

- [1] Y. Yang, C. Dejous, and H. Hallil, "Trends and Applications of Surface and Bulk Acoustic Wave Devices: A Review," *Micromachines*, 2023, vol. 14 (1), 43, pp. 1-21.
- [2] J. Startt et al., "Unlocking AlN Piezoelectric Performance with Earth-Abundant Dopants," *Advanced Electronic Materials*, 2023, vol. 9, 2201187, pp. 1-10.
- [3] Y. Zou et al., "Aluminum scandium nitride thin-film bulk acoustic resonators for 5G wideband applications," *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, vol. 8:124, pp. 1-7.
- [4] X.H. Zha et al., "Surface and bulk acoustic wave resonators based on aluminum nitride for bandpass filters," *AAPPS Bulletin*, 2024, vol. 34, no. 14, pp. 1-15.
- [5] W. Dou et al., "Super-High-Frequency Bulk Acoustic Resonators Based on Aluminum Scandium Nitride for Wideband Applications," *Nanomaterials*, 2023, vol. 13(20), Article 2737, pp. 1-12.
- [6] A. Tag et al., "Influence of temperature distribution on behavior, modeling, and reliability of BAW resonators," *2014 IEEE International Reliability Physics Symposium*, Waikoloa, HI, USA, 2014, pp. 5C.5.1-5C.5.7.
- [7] X. Liang et al., "Mechanically Driven Solidly Mounted Resonator-Based Nanoelectromechanical Systems Magnetolectric Antennas," *Advanced Engineering Materials*, 2023, vol. 25, Article 2300425, pp. 1-11.
- [8] C.Y. Chung et al., "Fabrication of a 3.5-GHz Solidly Mounted Resonator by Using an AlScN Piezoelectric Thin Film," *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 10, Article 1151, pp. 1-12.
- [9] P.K. Joshi, K.R. Latwe, and M.A. Hasamnis, "Analysis and enhancement of Q-factor in thin-film bulk acoustic wave resonator (FBAR)," *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2273, Article 012010, pp. 1-9.

- [10] Y. Song et al., "Thermal Conductivity of Aluminum Scandium Nitride for 5G Mobile Applications and Beyond," *Functional inorganic materials and devices*, 2021, vol. 13, iss. 16, pp. 19031-19041.
- [11] B. Sundarapandian et al., "Influence of growth temperature on the properties of aluminum nitride thin films prepared by magnetron sputter epitaxy," *Journal of Applied Physics*, 2023, vol. 134, Article 185107, pp. 1-10.
- [12] T. Mirea, J. Olivares, M. Clement, and J. Sangrador, "AlN-based solidly mounted resonators at 400°C: in-situ performance monitoring," *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Glasgow, UK, 2019, pp. 1700-1702.
- [13] G.H. Feng et al., "Investigation of Mo Doping Effects on the Properties of AlN-Based Piezoelectric Films Using a Sputtering Technique," *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2022, vol. 11 (12), Article 123005.
- [14] H. Igeta, M. Totsuka, M. Suzuki, and T. Yanagitani, "Temperature Characteristics of ScAlN/SiO₂ BAW Resonators," *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Kobe, Japan, 2018, pp. 1-4.
- [15] T.N. Tanskaya, A.G. Kozlov, and V.N. Zima, "The investigation of influence of dielectric layer in Bragg reflector on characteristics of thin-film BAW resonator," *Radio communication technology*, 2016, Iss. 4 (31), pp. 110-118. (in Russian)
- [16] N.M. Zhilin, T.N. Ulaeva, N.A. Chirikov, and A.G. Kozlov, "An Influence of an Electrode Configuration on Electrical Parameters of a Microelectronic Bulk Acoustic Wave Resonator with a Bragg Reflector," *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russia, 2024, pp. 1-4.
- [17] M.I. Mironova, et al., "Characterization of Structure, Morphology, Optical and Electrical Properties of AlN-Al-V Multilayer Thin Films Fabricated by Reactive DC Magnetron Sputtering," *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 223, pp. 1-22.
- [18] T.N. Torgash, N.A. Chirikov, A.G. Kozlov, and V.I. Strunin, "Investigation of Temperature Effect on Electrical Characteristics of Solidly Mounted Resonator," *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russia, 2022, pp. 1-4.
- [19] T.N. Torgash, A.G. Kozlov, and N.A. Chirikov, "Influence of temperature on frequency characteristics of microelectronic BAW resonator with Bragg reflector," *Radio communication technology*, 2022, Iss. 2 (53), pp. 111-117. (in Russian)
- [20] J. Munir et al., "Effects of compensating the temperature coefficient of frequency with the acoustic reflector layers on the overall performance of solidly mounted resonators," *Ultrasonics*, 2017, vol. 74, pp. 153-160.
- [21] D. Chen et al., "The AlN based solidly mounted resonators consisted of the all-metal conductive acoustic Bragg reflectors," *Vacuum*, 2010, vol. 85, pp. 302-306.
- [22] C.L. Wei et al., "Solidly mounted resonators consisting of a molybdenum and titanium Bragg reflector," *Applied Physics A*, 2008, vol. 90, pp. 501-506.
- [23] T.N. Ulaeva, N.M. Zhilin, N.A. Chirikov, and V.I. Strunin, "A Study of a Temperature Effect on Characteristics of a Solidly Mounted Resonator Based on AlN, Al, Mo and Ti Thin Films," *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russia, 2024, pp. 1-5.
- [24] T.D. Ha, "Effects of material and dimension on TCF, frequency, and Q of radial contour mode AlN-on-Si MEMS resonators," *Journal of Electronic Science and Technology*, 2021, vol. 19, no. 100120, pp. 1-13.
- [25] M.Yu. Dvoesherstov, V.I. Cherednick, "Thin-film microwave acoustoelectronic components," *Components and technologies*, 2014, vol. 5, pp. 8-12. (in Russian)

Funding

The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation and the governments of the Omsk region within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 23-12-20010.