

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ОАВ РЕЗОНАТОРЫ: ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Улаева Татьяна Николаевна,
Омский научный центр Сибирского отделения РАН;
Омский научно-исследовательский институт приборостроения;
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,
Омск, Россия, tanskaya-89@mail.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-9-35-42

Manuscript received 20 June 2025;
Accepted 28 August 2025

Чириков Никита Александрович,
Омский научный центр Сибирского отделения РАН;
Омский научно-исследовательский институт приборостроения,
Омск, Россия

Давлеткильдеев Надим Анварович,
Омский научный центр Сибирского отделения РАН;
Омский научно-исследовательский институт приборостроения,
Омск, Россия

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

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

Бестугин Александр Роальдович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: подводимая мощность, ОАВ
резонатор, объемная акустическая волна, брэгговский
отражатель, добротность, лестничный фильтр

В работе экспериментально исследовано влияние подводимой мощности на электрические характеристики микроэлектронных ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем на основе шести пар пленок Mo-Ti и различной активной площадью. Измерения выполнены в диапазоне мощностей от -27 дБм до +9 дБм с использованием векторного анализатора цепей. По результатам измерения были рассчитаны эквивалентные электрические параметры ОАВ-резонаторов для каждого образца. Показано, что реакция резонаторов на рост мощности определяется площадью: для малых значений площади наблюдается улучшение согласования, тогда как для больших площадей наблюдается ухудшение; добротность при переходе от малосигнального режима (мощность ниже -18 дБм) к умеренным уровням (мощность от -9 дБм до 0 дБм) может немного возрастать, но при дальнейшем увеличении мощности снижается из-за тепловых и акустических

потерь. Отмечен устойчивый рост статической емкости с мощностью, тогда как динамическая емкость изменяется по-разному в зависимости от геометрии резонатора. На основе экспериментальных данных проведено схемотехническое моделирование П-образного звена лестничного фильтра. В диапазоне мощностей от -27 дБм до 9 дБм характеристики фильтра остаются практически неизменными: центральная частота 4,217 ГГц, относительная полоса пропускания 4 %, вносимые потери 1,3-1,4 дБ, гарантированное затухание при отстройке на 10 % составляет около -15 дБ. Полученные результаты подтверждают устойчивость фильтров на основе ОАВ-резонаторов к изменениям уровня подводимой мощности в типичных режимах измерительной и сенсорной аппаратуры и могут использоваться для проектирования резонаторов и фильтров, а также для выбора оптимальной активной площади с учетом тепловых и нелинейных эффектов.

Информация об авторах:

Улаева Татьяна Николаевна, к.т.н., Институт Радиофизики и Физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук; Омский научно-исследовательский институт приборостроения; 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; Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Россия. ORCID: 0000-0003-2920-056X

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

Бестугин Александр Роальдович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0003-3847-2516

Для цитирования:

Улаева Т.Н., Чириков Н.А., Давлеткильдеев Н.А., Казаков В.И., Бестугин А.Р. Микроэлектронные ОАВ резонаторы: влияние конструктивных и электрических параметров на их характеристики и моделирование полосовых фильтров на их основе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №9. С. 35-42.

For citation:

T.N. Ulaeva, N.A. Chirikov, N.A. Davletkildееv, V.I. Kazakov, A.R. Bestugin, "Microelectronic BAW resonators: effect of structural and electrical parameters and bandpass filter modeling," T-Comm, 2025, vol. 19, no.9, pp. 35-42. (in Russian)

Введение

В современных системах связи и радиоэлектроники устройства для частотной селекции и генерации сигналов, работающие в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, играют ключевую роль. Потребность в повышении плотности каналов, снижении энергопотребления и миниатюризации аппаратуры приводит к стремительному росту требований к элементной базе. Среди разнообразных решений особое внимание уделяется микроэлектронным резонаторам на объемных акустических волнах (ОАВ) с брэгговским отражателем, которые отличаются высокой механической прочностью, устойчивостью к внешним воздействиям и стабильностью при изменении параметров окружающей среды. Благодаря этим свойствам ОАВ-резонаторы рассматриваются как перспективная основа для разработки фильтров, опорных генераторов и высокочувствительных сенсорных элементов, востребованных как для телекоммуникационных систем, так и для высокоточной измерительной аппаратуры [1-5].

Конструктивные особенности резонаторов с брэгговским отражателем обеспечивают эффективную акустическую изоляцию пьезоэлектрического преобразователя от подложки за счет использования многослойной структуры с чередующимися слоями, имеющими разницу в акустических импедансах. За счет периодического чередования материалов формируется отражающая брэгговская структура, препятствующая утечке акустической энергии и концентрирующая ее в активной области резонатора. Это позволяет эффективно удерживать механическую энергию в структуре и достигать высоких значений добротности при минимальных габаритах устройства [6-9]. Дополнительным преимуществом выступает технологическая совместимость: процессы осаждения тонких пленок и фотолитографии хорошо сочетаются с промышленными маршрутами микроэлектроники, что делает возможным серийное изготовление массивов ОАВ-резонаторов и интеграцию их в состав функциональных микросборок и СВЧ-модулей.

Перспективными материалами для создания таких резонаторов являются пленки нитрида алюминия, обладающие высокой скоростью распространения объемной акустической волны, хорошими температурными характеристиками, высоким коэффициентом электромеханической связи и значительным пьезоэлектрическим модулем. Пленки нитрида алюминия получают методом магнетронного распыления. Контроль параметров осаждения (давления в вакуумной камере, мощности на мишени, температуры подложки) играет ключевую роль в достижении высоких значений пьезоэлектрического коэффициента и стабильности параметров во времени. Одним из ограничивающих факторов при осаждении AlN являются внутренние механические напряжения, способные приводить к изгибу подложки и деградации резонансных характеристик. Для уменьшения влияния этих напряжений и эффективного удержания акустической энергии используется брэгговский отражатель. В качестве слоев брэгговского отражателя используются металлические (Mo, Ti, W, Al и др.) и диэлектрические (SiO₂, Ta₂O₅ и др.) пленки, обеспечивающие необходимую разницу в акустических импедансах материалов. Выбор конкретных пар материалов (например, высоко- и низкоимпедансных металлических слоев или комбинаций металл/диэлектрик) позволяет

настраивать как глубину запрещенной акустической зоны и добротность, так и тепловые свойства брэгговского отражателя, что напрямую влияет на стабильность резонансных характеристик при реальной эксплуатации [10].

Несмотря на многочисленные преимущества данных устройств, одним из сдерживающих факторов широкого внедрения ОАВ-резонаторов является ограничение по допустимому уровню подводимой и рассеиваемой мощности. В условиях значительных электрических нагрузок резонаторы подвергаются воздействию переменных сигналов, которые могут приводить к самонагреву, изменению электрических параметров, что может существенно влиять на стабильность и надежность функционирования узлов приемопередающей аппаратуры [11].

Существующие публикации [12-15] подробно освещают температурные зависимости резонансных характеристик и влияние материалов брэгговских отражателей на добротность и температурный коэффициент частоты (ТКЧ). В то же время систематических исследований влияния входной мощности в диапазоне, типичном для измерительной и сенсорной аппаратуры, заметно меньше, особенно при переходе от отдельного резонатора к фильтровым структурам, где требуется совместить экспериментальную параметризацию с последующим схемотехническим моделированием. Заполнение этого пробела представляется актуальной задачей, имеющей как научное, так и прикладное значение.

В связи с этим исследование влияния подводимой мощности на электрические характеристики резонаторов с брэгговским отражателем является актуальной задачей, решение которой позволит оптимизировать их конструкцию и расширить область применения в современных радиоэлектронных устройствах. Практическая значимость заключается в необходимости закладывать корректные допуски на уровне устройств частотной селекции и опорной генерации, работающих в составе реальных трактов с заданными значениями мощности [16, 17].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния подводимой мощности на электрические характеристики и параметры микроэлектронных ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем (на основе шести пар пленок Mo-Ti) при различных активных площадях и последующее схемотехническое моделирование электрической схемы полосовых фильтров на основе полученных данных.

Исследование охватывает область входных мощностей от -27 дБм до +9 дБм, соответствующую реальным режимам измерений и эксплуатации устройств. Для каждого уровня подводимой мощности были определены эквивалентные электрические параметры модели резонатора, что позволило обеспечить согласованность полученных экспериментальных результатов и их корректное использование при последующих расчетах фильтровых структур.

Методика эксперимента

Образцы резонаторных структур на основе шести пар тонкопленочных слоев Mo-Ti были получены на подложках СТ-50-1-1-0,6 методом магнетронного распыления с последующим использованием методов фотолитографии, в соответствии с работой авторов [18]. Образцы исследовались при помощи анализатора цепей Agilent E5071C с подключенными

ми к нему зондами GSG с конфигурацией 600 мкм. Полученные ОАВ-резонаторы, с площадями, соответствующими 8100 мкм², 14400 мкм², 90000 мкм², 161000 мкм², 273000 мкм², помещались на предметный стол, совмещенный с анализатором цепей. Резонаторы поочередно обмерялись на заранее откалиброванном приборе на мощность -27 дБм, затем прибор перекалибровывался на -18 дБм, -9 дБм, 0 дБм и 9 дБм соответственно, и образцы исследовались при каждом значении. Перед измерением параметров каждый образец выдерживался в течение двух минут на необходимом пределе мощности, для стабилизации тепловых и электрических параметров. Выбранный диапазон подводимых мощностей является типичным для измерительной и сенсорной аппаратуры.

Полученные экспериментальные данные использовались для определения эквивалентных электрических параметров резонаторов по модели Баттерворта-ван Дайка. Эта модель описана авторами в работе [19]. Отметим, что в данной модели резонатор представляется эквивалентной электрической цепью, состоящей из статической емкости (C_0), динамической емкости (C_m), динамической индуктивности (L_m) и динамического сопротивления (R_m).

Выбор электрической схемы полосового фильтра

Для исследования влияния подводимой мощности на характеристики полосовых фильтров, построенных на основе микроэлектронных ОАВ-резонаторов, необходимо выбрать такую электрическую схему, которая с одной стороны корректно отражает основные изменения параметров самого резонатора при различных уровнях возбуждения, а с другой стороны остается достаточно простой для обеспечения прозрачности анализа и возможности сопоставления экспериментальных и расчетных данных. Учитывая данные требования, в настоящей работе в качестве базового объекта исследования было выбрано П-образное звено лестничного фильтра, включающее один ОАВ-резонатор, расположенный в продольной ветви электрической цепи. Электрическая схема указанного звена лестничного фильтра приведена на рисунке 1.

Выбор П-образного звена в качестве исследуемого объекта обусловлен рядом факторов. Во-первых, это одна из наиболее распространенных конфигураций при построении лестничных фильтров СВЧ диапазона, что обеспечивает универсальность получаемых результатов и возможность их последующего переноса на более сложные многозвенные структуры. Во-вторых, данная схема включает минимально необходимый набор реактивных элементов – две индуктивности (L_1 , L_2) и одну емкость (C_1), которые выполняют функции согласующих и расширительных звеньев и формируют вместе с ОАВ-резонатором частотно-зависимую передающую функцию. Простота структуры обеспечивает однозначность интерпретации и исключает влияние множества дополнительных факторов, неизбежно возникающих в сложных многорезонаторных схемах. В отличие от многоэлементных фильтров, где нелинейные и тепловые эффекты могут маскироваться сложными взаимодействиями резонаторов и паразитными связями, анализ одиночного звена позволяет выделить собственные закономерности изменения параметров именно одного резонатора, что является целью работы.

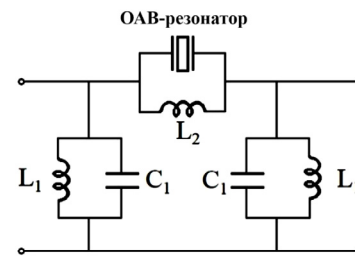


Рис. 1. Электрическая схема П-образного звена полосового фильтра на основе одного ОАВ-резонатора

В результате любые изменения резонансной частоты, добротности или эквивалентных электрических параметров самого резонатора непосредственно отражаются на формировании полосы пропускания и задерживания сигнала.

Отсутствие дополнительных каскадов и сложных взаимосвязей между элементами упрощает сопоставление теоретических (расчетных) и экспериментальных откликов, что позволяет детально проанализировать, каким образом подводимая мощность на резонатор влияет на формирование полосы пропускания и задерживания сигнала. При этом П-образная схема является основой для более сложных многоэлементных фильтров. Изучение одного звена позволяет получить детальную информацию о комплексном изменении параметров ОАВ-резонатора, а также уточнить модель для дальнейшего проектирования и оптимизации фильтра. Корректное описание поведения одного резонатора при различных значениях подводимой мощности может быть распространено на каскадирование нескольких резонаторов.

Таким образом, выбранная П-образная схема с одним ОАВ-резонатором представляет основу для комплексной оценки влияния подводимой мощности на характеристики фильтра и позволяет максимально использовать полученные экспериментальные данные и закладывает базу для дальнейшего масштабирования на многорезонаторные структуры.

Важно подчеркнуть, что в рамках настоящего исследования параметры пассивных элементов считаются фиксированными и не зависят от уровня подводимой мощности. Их изменение в реальной схеме не превышает 1-2 %, что соответствует типовым технологическим допускам тонкопленочного производства и может считаться несущественным в сравнении с изменениями характеристик резонатора. Таким образом, любые наблюдаемые отклонения амплитудно-частотной характеристики при изменении подводимой мощности с высокой степенью достоверности могут быть отнесены именно к изменениям свойств пьезоэлектрической активной структуры.

Следует отметить и ограничения данного подхода. В предложенной схеме намеренно не учитывается влияние подводимой мощности на пассивные элементы, поскольку их чувствительность к уровню подводимого сигнала на порядки ниже чувствительности активной пьезоэлектрической структуры. Для типичных мощностей в диапазоне от -27 до +9 дБм индуктивности и конденсаторы ведут себя линейно. Основной вклад в нелинейное поведение устройства вносит именно ОАВ-резонатор.

В практическом плане такой подход открывает возможность более точного проектирования фильтров и резонаторов, предназначенных для работы в условиях переменной

мощности. При разработке СВЧ аппаратуры особое значение имеет способность устройства сохранять стабильные характеристики при изменении уровня входного сигнала. Полученные данные показывают, что корректный учет изменений параметров резонатора в зависимости от подводимой мощности позволяет прогнозировать работу фильтра и закладывать оптимальные конструктивные решения на этапе моделирования.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В данной работе исследовались экспериментальные образцы микроволновых ОАВ-резонаторов с брегговским отражателем на основе 6 пар слоев пленок молибдена и титана с различной активной площадью. Исходные параметры ОАВ-резонаторов определяли при комнатной температуре и подводимой мощности -27 дБм. Параметры представлены в таблице 1.

Здесь: S_{cl} – активная площадь резонатора; f_s и f_p – частоты последовательного и параллельного резонансов; Δf – ширина резонансного промежутка; Z_s и Z_p – входной электрический импеданс на частотах последовательного и параллельного резонансов; Q – добротность; G_{max} – активная проводимость на частоте последовательного резонанса S_{11min} – коэффициент отражения по мощности на частоте последователь-

ного резонанса; C_0 – статическая емкость, C_m – динамическая емкость, L_m – динамическая индуктивность, R_m – динамическое сопротивление.

Образцы ОАВ-резонаторов работают на частоте 4,2 ГГц, имеют резонансный промежуток около 16 МГц и высокую добротность до 684 единиц.

На рисунках 2-5 приведены экспериментальные результаты по исследованию характеристик ОАВ-резонаторов от уровня подводимой мощности.

На рисунках 2 и 3 приведены частотные зависимости модуля входного электрического импеданса и коэффициента отражения для двух образцов ОАВ-резонаторов. Видно, что при увеличении подводимой мощности происходит незначительное изменение электрического импеданса на частоте последовательного резонанса, а уменьшение электрического импеданса на частоте параллельного резонанса составляет от 15 до 30%. В свою очередь изменение коэффициента отражения носит противоречивый характер. Для резонаторов с малой площадью до 0,04 мм² (рис. 2) наблюдается улучшение согласования (уменьшение коэффициента отражения S_{11}), а для резонаторов с большей площадью от 0,09 мм² (рис. 3) наблюдается снижение согласования (увеличение коэффициента S_{11}) при увеличении подводимой мощности, что согласуется с литературными данными [11, 20, 21].

Таблица 1

Электрические параметры экспериментальных образцов ОАВ-резонаторов при мощности -27 дБм

№ образца	$S_{cl}, \text{мм}^2$	Электрические параметры резонатора					
		$f_s, \text{ГГц}$	$f_p, \text{ГГц}$	$\Delta f, \text{МГц}$	$Z_s, \text{Ом}$	$Z_p, \text{Ом}$	Q
1	0,0081	4,21094	4,22750	16,56	4,26	102,4	684,0
2	0,040	4,21563	4,23125	15,63	4,21	73,3	626,0
3	0,090	4,23450	4,25125	16,75	1,40	39,0	533,2
4	0,161	4,21688	4,23344	16,56	2,57	20,4	653,0
5	0,260	4,25500	4,27156	16,56	1,15	11,58	387,4

№ образца	$S_{cl}, \text{мм}^2$	$G_{max}, \text{мСм}$	$S_{11min}, \text{дБ}$	$C_0, \text{пФ}$	$C_m, \text{фФ}$	$L_m, \text{нГн}$	$R_m, \text{Ом}$
1	0,0081	229,2	-10,7	2,18	17,21	82,99	218,1
2	0,040	501,7	-14,7	3,50	25,98	54,86	302,2
3	0,090	688,2	-17,6	7,37	65,45	21,61	656,3
4	0,161	764,0	-6,8	14,80	116,45	12,23	1414,4
5	0,260	855,8	-3,8	24,70	192,63	7,26	1426,0

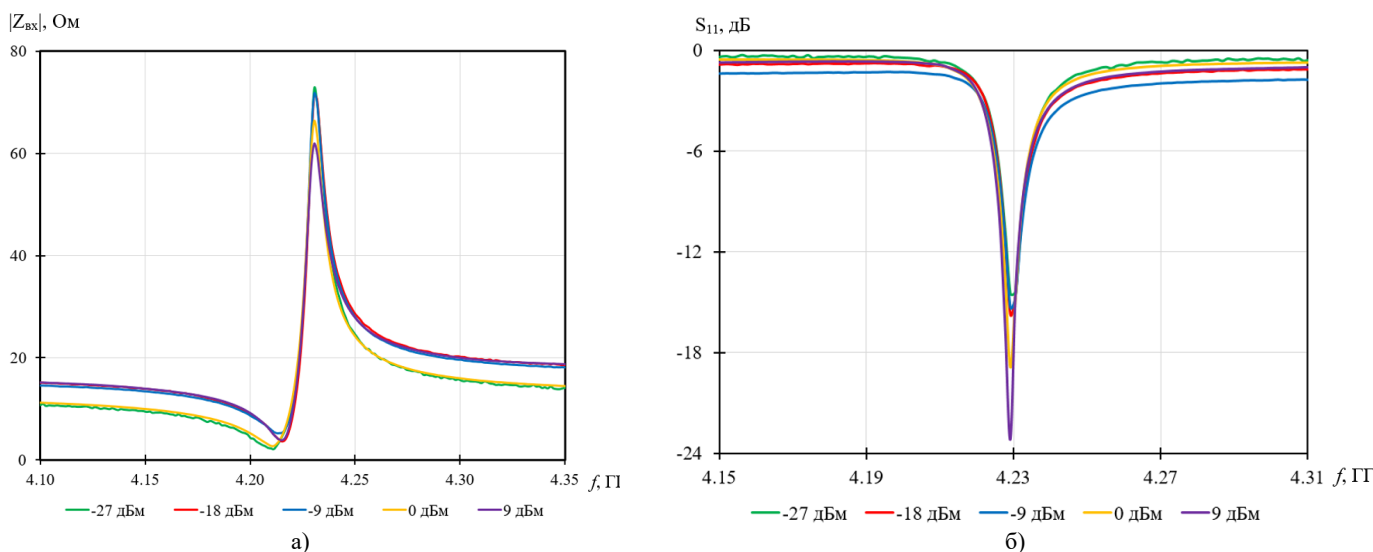


Рис. 2. Частотные зависимости модуля входного электрического импеданса (а) и коэффициента отражения (б) ОАВ-резонаторов (образец № 2) при разной подводимой мощности

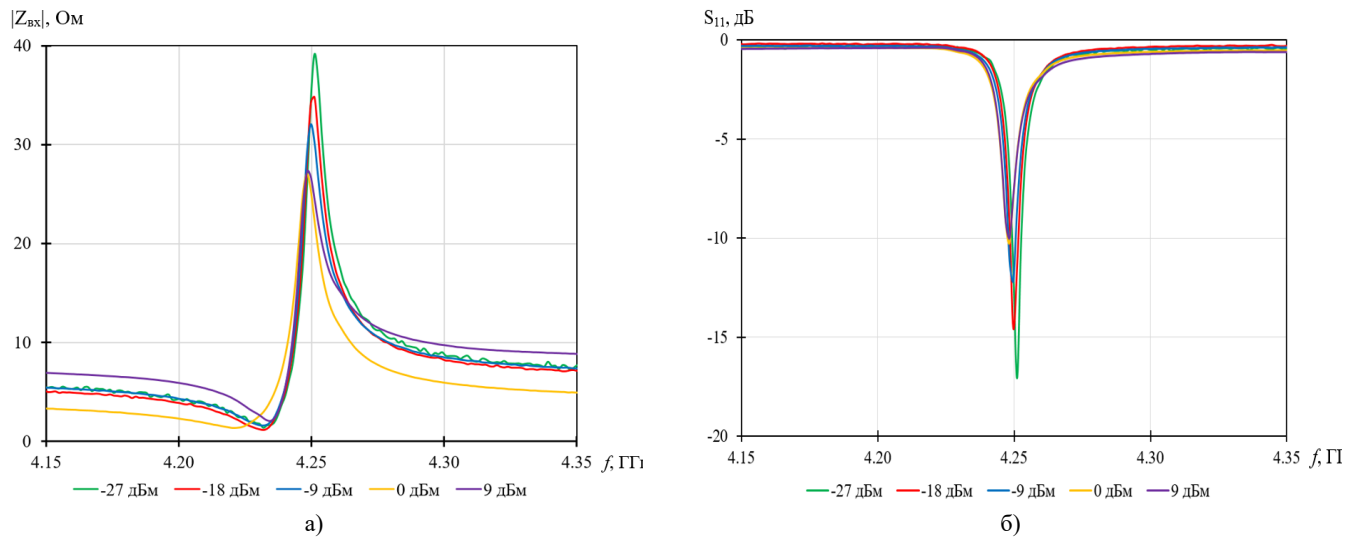


Рис. 3. Частотные зависимости модуля входного электрического импеданса (а) и коэффициента отражения (б) ОАВ-резонаторов (образец № 3) при разной подводимой мощности

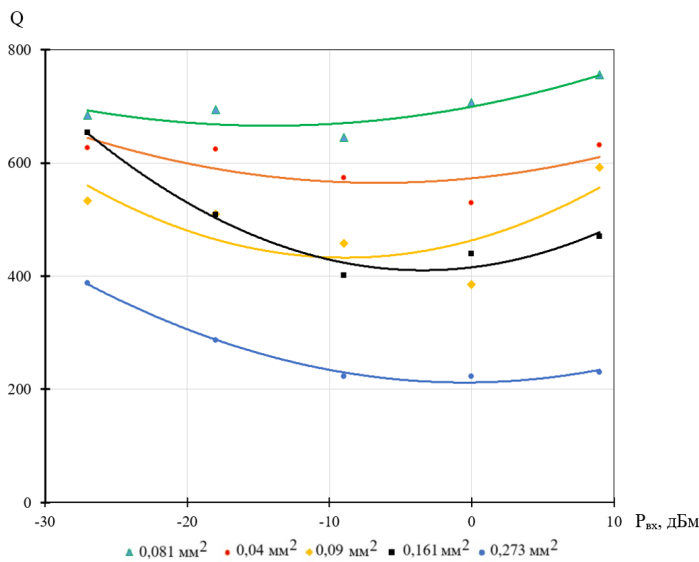


Рис. 4. Влияние подводимой мощности на добротность в зависимости от активной площади ОАВ-резонатора

На рисунке 4 показано изменение добротности резонаторов в зависимости от уровня подводимой мощности. В малосигнальном режиме (при мощностях ниже -18 дБм) ОАВ-резонатор работает почти линейно и обладает максимальной добротностью. При повышении мощности наблюдается два возможных сценария. В резонаторах с малой площадью добротность сначала незначительно возрастет при переходе от очень низких уровней мощности к умеренным, однако при дальнейшем увеличении мощности наступают дополнительные потери – тепловые (связанные с повышением температуры из-за рассеяния энергии) и акустические нелинейные потери. Поэтому наблюдается снижение добротности на высоких уровнях мощности. Таким образом, высокая энергия в резонаторе приводит к деградации добротности и может вызвать нестабильность параметров при длительном воздействии [22, 23].

На рисунке 5 показаны изменения статической и динамической емкостей от уровня подводимой мощности. Показано, что с увеличением мощности увеличивается статическая емкость резонатора.

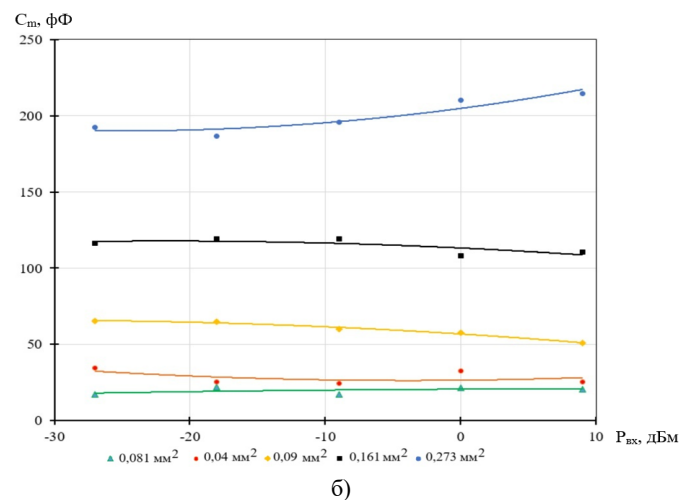
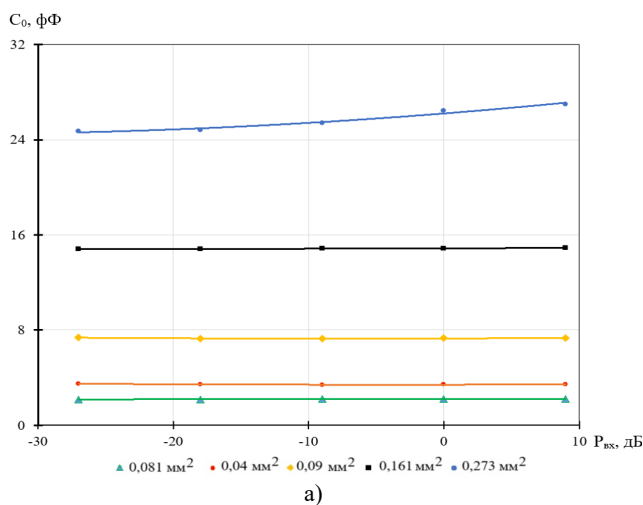


Рис. 5. Влияние подводимой мощности на статическую (а) и динамическую емкости в зависимости от активной площади ОАВ-резонатора

После проведения экспериментальных исследований по влиянию подводимой мощности на характеристики ОАВ-резонаторов переходим к следующему этапу – схемотехническое моделирование электрической схемы П-образного звена лестничного фильтра на основе одиночного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем. На рисунке 6 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) П-образного звена такого лестничного фильтра, а основные параметры фильтра приведены в таблице 2. Номиналы расширительных элементов в электрической схеме равны $L_1 = 0,143$ нГн, $L_2 = 0,248$ нГн, $C_1 = 10,0$ пФ для исследованных ОАВ-резонаторов и их изменение в разных схемах составляет не более 2 %.

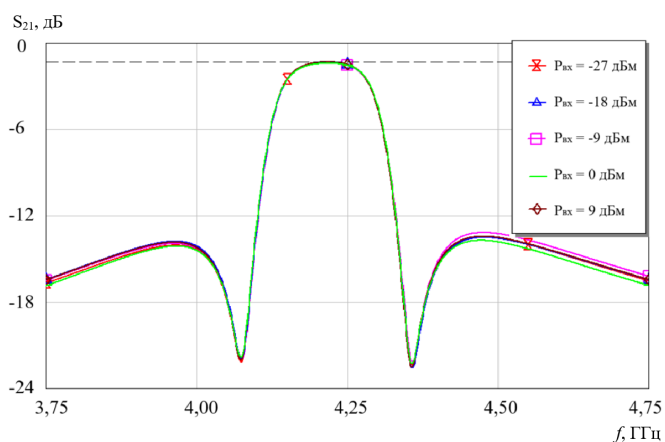


Рис. 6. АЧХ П-образного звена лестничного фильтра на основе одного ОАВ-резонатора при разных уровнях подводимой мощности

Таблица 2

Параметры П-образного звена лестничного фильтра на основе измеренных характеристик ОАВ-резонаторов в зависимости от подводимой мощности

Подводимая мощность, дБм	Центральная частота, ГГц	Относительная полоса пропускания, %	Вносимые потери, дБ	Гарантированное затухание при отстройке на 10 %
-27	4,217	4	-1,332	-15,10
-18	4,217	4	-1,313	-15,06
-9	4,217	4	-1,330	-14,76
0	4,217	4	-1,398	-15,43
9	4,217	4	-1,311	-15,03

Из представленных данных видно, что характеристики фильтра практически не зависят от уровня мощности в диапазоне -27...+9 дБм: увеличение подводимой мощности приводит к незначительным изменениям вносимых потерь и гарантированного затухания при отстройке на 10%.

На практике пассивные элементы и ОАВ-резонатор данной электрической схемы фильтра могут быть изготовлены с использованием тонкопленочной технологии в едином технологическом цикле.

Заключение

В работе представлено экспериментальное исследование влияния подводимой мощности на резонансные характеристики микроэлектронных ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем на основе шести пар слоев Мо-Тi и различной активной площадью, а также выполнено схемотехническое моделирование П-образного звена лестничного фильтра на основе измеренных параметров. Показано, что все исследованные резонаторы работают вблизи 4,2 ГГц с резонансным промежутком порядка 16 МГц и демонстрируют высокую добротность (до 684 единиц для малой площади).

Ключевой результат состоит в выявлении различного отклика резонаторов на рост подводимой мощности в зависимости от активной площади. Для малых площадей наблюдается тенденция к улучшению согласования на частоте последовательного резонанса (уменьшение коэффициента S_{11}), а для больших площадей фиксируется ухудшение согласования и снижение добротности (рост эквивалентного динамического сопротивления и статической емкости) по мере увеличения мощности. Добротность при росте мощности сначала может увеличиваться (при значениях мощности ниже 0 дБм), но затем снижается из-за тепловых и акустических потерь.

Показано, что статическая емкость увеличивается с ростом подводимой мощности, что связано с тепловым влиянием на диэлектрические свойства, тогда как динамическая емкость изменяется с зависимости от активной площади и режима работы.

Результаты схемотехнического моделирования П-образного звена лестничного фильтра, выполненного на базе измеренных эквивалентных электрических параметров для каждого уровня мощности, показали высокую устойчивость частотных характеристик: центральная частота остается стабильной на уровне 4,217 ГГц, относительная полоса пропускания – около 4%, вносимые потери меняются в пределах $\approx 0,1$ дБ, гарантированное затухание в полосе задерживания при отстройке на 10 % остается близким к -15 дБ во всем исследованном диапазоне мощностей от -27 дБм до +9 дБм.

Для рассматриваемого П-образного звена лестничного фильтра на основе ОАВ-резонатора наблюдается стабильность частотных характеристик, что подтверждает его пригодность для практического применения, в том числе в условиях изменения уровня сигнала. При каскадировании звеньев ожидается сохранение стабильности электрических характеристик полосовых фильтров при условии однородности тепловых условий в многослойной структуре.

Полученные результаты демонстрируют, что в типичных режимах измерительной и сенсорной аппаратуры фильтры на основе ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем обладают высокой устойчивостью к вариациям входного уровня, а влияние мощности может быть корректно учтено за счет простой, но информативной параметризации эквивалентной электрической схемы.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании фильтров и сенсорных систем на основе ОАВ-резонаторов, где важна стабильность при переменном уровне подводимой мощности.

Финансирование

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

Литература

1. Berger C. et al. Bulk acoustic wave – Solidly mounted resonator with a-SiOCN:H as low-Z material // Journal of Applied Physics, 2024, vol. 136, Article 144501, pp. 1-11.
2. Wang Z. et al. High Figure of Merit 4.5 GHz Solidly Mounted Resonator Fabricated Using High-Quality Al_{0.8}Sc_{0.2}N Films // in IEEE Electron Device Letters, 2024, vol. 45, no. 11, pp. 2229-2232.
3. Tamboli A., Kale A., Hrnčirik F., Demiguel-Ramos M. and Flewitt A.J. Oven-controlled Dual-mode Solidly Mounted Resonator (SMR) Based Biosensor // in IEEE Sensors Journal, 2025.
4. Barrera O. et al. 18 GHz Solidly Mounted Resonator in Scandium Aluminum Nitride on SiO₂/Ta₂O₅ Bragg Reflector // in Journal of Microelectromechanical Systems, 2024, vol. 33, no. 6, pp. 711-716.
5. Anderson I. et al. Solidly Mounted Scandium Aluminum Nitride on Acoustic Bragg Reflector Platforms at 14–20 GHz // in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2025, vol. 72, no. 5, pp. 656-662.
6. Liu Y., Cai Y., Zhang Y., Tovstopyat A., Liu S. and Sun C. Materials, Design and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review // Micromachines, 2020, vol. 11, 630 (26 p.).
7. Liang X. et al. Mechanically Driven Solidly Mounted Resonator-Based Nanoelectromechanical Systems Magnetolectric Antennas // Advanced Engineering Materials, 2023, vol. 25, Article 2300425, pp. 1-11.
8. 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, Article 185107, pp. 1-10.
9. Han C., Wang X., Zhao Q., Teng L. et al. Solidly mounted resonator sensor for biomolecule detections // The Royal Society of Chemistry 2019, RSC Adv., 9, pp. 21323-21328, 2019.
10. Mansfel'D G.D., Popova D.V., Alekseev S.G., Polzikova N.I. Analysis of thin-film Bragg structures and piezoelectric microwave resonators on their basis // Journal of Communications Technology and Electronics, 2010, Vol. 55, no. 11, pp. 1295-1303.
11. Ivira B., Fillit R. -Y., Ndagijimana F., Benech P., Parat G. and Ancy P. Self-heating study of bulk acoustic wave resonators under high RF power // in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, vol. 55, no. 1, pp. 139-147.
12. Chen D., Xu Y., Wang J., Zhang L., Wang X. and Liang M. The AlN based solidly mounted resonators consisted of the all-metal conductive acoustic Bragg reflectors // Vacuum, 2010, Vol. 85, pp. 302-306.
13. 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.
14. Igeta H., Totsuka M., Suzuki M. and Yanagitani T. Temperature Characteristics of ScAlN/SiO₂ BAW Resonators // 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, Japan, 2018, pp. 1-4.
15. DeMiguel-Ramos M. et al. The influence of acoustic reflectors on the temperature coefficient of frequency of solidly mounted resonators // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 1472-1475.
16. Wunnicke O., van der Wel P.J., Strijbos R.C. and de Bruijn F. Thermal behavior of BAW filters at high RF power levels // in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, vol. 56, no. 12, pp. 2686-2692.
17. Ruppel C.C.W. Acoustic Wave Filter Technology—A Review // in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, vol. 64, no. 9, pp. 1390-1400.
18. 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 микроволновых ОАВ-резонаторов с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №11. С. 4-13.
19. Танская Т.Н., Козлов А.Г. и Зима В.Н. Исследование влияния диэлектрического слоя в брэгговском отражателе на характеристики тонкопленочного ОАВ-резонатора // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 4 (31). С. 110-118.
20. Ueda M., Iwaki M., Nishihara T., Satoh Y. and Hashimoto K. -y. A circuit model for nonlinear simulation of radio-frequency filters using bulk acoustic wave resonators // in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, vol. 55, no. 4, pp. 849-856.
21. Tag A. et al. A Method for Accurate Modeling of BAW Filters at High Power Levels // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, vol. 63, no. 12, pp. 2207-2214.
22. Aigner R., Huynh N. -H., Handtmann M. and Marksteiner S. Behavior of BAW devices at high power levels // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005, Long Beach, CA, USA, 2005, pp. 429-432.
23. Fattinger M., Stokes P. and Fattinger G. Thermal modeling of WLP-BAW filters: Power handling and miniaturization // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Taipei, Taiwan, 2015, pp. 1-4.

MICROELECTRONIC BAW RESONATORS: EFFECT OF STRUCTURAL AND ELECTRICAL PARAMETERS AND BANDPASS FILTER MODELING

Tatiana N. Ulaeva, Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering; 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 Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russia

Nadim A. Davletkildeev, 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
Alexander R. Bestugin, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The influence of input power on the electrical characteristics of microelectronic BAW resonators with Bragg reflectors based on six pairs of Mo-Ti thin films and different active areas has been experimentally investigated. Measurements were carried out in the power range from -27 dBm to +9 dBm using a vector network analyzer, and the equivalent electrical parameters of the BAW resonators were extracted for each sample. It was shown that the response of the resonators to increasing power depends on the active area: for small apertures an improvement in matching is observed, whereas for larger apertures matching deteriorates; the quality factor can slightly increase when moving from the small-signal regime to moderate power levels, but then decreases due to thermal and acoustic losses at higher powers. A steady increase in static capacitance with

power was observed, while the dynamic capacitance changes differently depending on geometry. Based on the experimental data, circuit-level modeling of a π -section ladder filter element was performed. In the range from -27 dBm to +9 dBm, the filter characteristics remain practically unchanged: the center frequency is 4.217 GHz, the relative bandwidth is 4%, the insertion loss is 1.3-1.4 dB, and the guaranteed rejection at a 10% frequency offset is about -15 dB. The obtained results confirm the robustness of BAW-resonator-based filters against variations in input power under typical conditions of measurement and sensing equipment and can be used for the design of resonators and filters, as well as for selecting the optimal active area with regard to thermal and nonlinear effects.

Keywords: input power, BAW resonator, bulk acoustic wave, Bragg reflector, quality factor, ladder filter

References

- [1] C. Berger et al., "Bulk acoustic wave-Solidly mounted resonator with a-SiOCN:H as low-Z material," *Journal of Applied Physics*, 2024, vol. 136, Article 144501, pp. 1-11.
- [2] Z. Wang et al., "High Figure of Merit 4.5 GHz Solidly Mounted Resonator Fabricated Using High-Quality Al.Sc.N Films," *IEEE Electron Device Letters*, 2024, vol. 45, no. 11, pp. 2229-2232.
- [3] A. Tamboli, A. Kale, F. Hrcirik, M. Demiguel-Ramos and A. J. Flewitt, "Oven-controlled Dual-mode Solidly Mounted Resonator (SMR) Based Biosensor," *IEEE Sensors Journal*, 2025.
- [4] O. Barrera et al., "18 GHz Solidly Mounted Resonator in Scandium Aluminum Nitride on SiO/TaO Bragg Reflector," *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2024, vol. 33, no. 6, pp. 711-716.
- [5] I. Anderson et al., "Solidly Mounted Scandium Aluminum Nitride on Acoustic Bragg Reflector Platforms at 14-20 GHz," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2025, vol. 72, no. 5, pp. 656-662.
- [6] Y. Liu, Y. Cai, Y. Zhang, A. Tovstopyat, S. Liu and C. Sun, "Materials, Design and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review," *Micromachines*, 2020, vol. 11, 630 (26 p.).
- [7] Liang X. et al., "Mechanically Driven Solidly Mounted Resonator-Based Nanoelectromechanical Systems Magnetolectric Antennas," *Advanced Engineering Materials*, 2023, vol. 25, Article 2300425, pp. 1-11.
- [8] 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.
- [9] C. Han, X. Wang, Q. Zhao, L. Teng et al., "Solidly mounted resonator sensor for biomolecule detections," *The Royal Society of Chemistry 2019*, RSC Adv., 9, 2019, pp. 21323-21328.
- [10] G.D. Mansfel'D, D.V. Popova, S.G. Alekseev, N.I. Polzikova, "Analysis of thin-film Bragg structures and piezoelectric microwave resonators on their basis," *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, vol. 55, no. 11, pp. 1295-1303.
- [11] B. Ivira, R. -Y. Fillit, F. Ndagijimana, P. Benech, G. Parat and P. Ancey, "Self-heating study of bulk acoustic wave resonators under high RF power," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, vol. 55, no. 1, pp. 139-147.
- [12] D. Chen, Y. Xu, J. Wang, L. Zhang, X. Wang and M. Liang, "The AlN based solidly mounted resonators consisted of the all-metal conductive acoustic Bragg reflectors," *Vacuum*, 2010, Vol. 85, pp. 302-306.
- [13] 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.
- [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] M. DeMiguel-Ramos et al., "The influence of acoustic reflectors on the temperature coefficient of frequency of solidly mounted resonators," *2014 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 1472-1475.
- [16] O. Wunnicke, P. J. van der Wel, R. C. Strijbos and F. de Bruijn, "Thermal behavior of BAW filters at high RF power levels," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, vol. 56, no. 12, pp. 2686-2692.
- [17] C. C. W. Ruppel, "Acoustic Wave Filter Technology-A Review," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2017, vol. 64, no. 9, pp. 1390-1400.
- [18] T.N. Ulaeva, N.A. Chirikov, N.M. Zhilin, N.A. Davletkildiev, V.I. Kazakov, O.V. Shakin, "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*, 2024, vol. 18, no.11, pp. 4-13. (in Russian)
- [19] 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)
- [20] M. Ueda, M. Iwaki, T. Nishihara, Y. Satoh and K. -y. Hashimoto, "A circuit model for nonlinear simulation of radio-frequency filters using bulk acoustic wave resonators," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, vol. 55, no. 4, pp. 849-856.
- [21] A. Tag et al., "A Method for Accurate Modeling of BAW Filters at High Power Levels," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, vol. 63, no. 12, pp. 2207-2214.
- [22] R. Aigner, N. -H. Huynh, M. Handtmann and S. Marksteiner, "Behavior of BAW devices at high power levels," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Long Beach, CA, USA, 2005, pp. 429-432.
- [23] M. Fattinger, P. Stokes and G. Fattinger, "Thermal modeling of WLP-BAW filters: Power handling and miniaturization," *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Taipei, Taiwan, 2015, pp. 1-4.

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.