

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.1>

УДК: 621.372.4, 621.793.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЛОЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ОАВ-РЕЗОНАТОРА ОТ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Н.М. Жилин^{1,2,3}, Т.Н. Улаева^{1,2,3}, Н.А. Чириков^{1,2}, В.Н. Щекатунова³, А.Н. Кузнецов^{1,2}

¹Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники),
644024, Омск, пр. Маркса, 15

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения,
644071, Омск, ул. Масленникова, 231

³Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,
644077, Омск, пр. Мира, 55-А

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. В работе исследовано влияние чувствительного слоя на электрические характеристики тонкопленочного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе 6 пар слоев молибдена-титана (Mo-Ti) и ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе трех пар слоев молибдена-алюминия и одной пары молибдена-диоксида кремния (Al-Mo-SiO₂). В качестве чувствительного материала использовался позитивный фоторезист, нанесенный капельным методом. Показано, что резонаторы с брэгговским отражателем Al-Mo-SiO₂ сохраняют частотные параметры и добротность практически без изменений, в то время как структуры с брэгговским отражателем Mo-Ti демонстрируют сдвиг резонансных частот, уменьшение резонансного промежутка и рост добротности. Изменения частотных характеристик подтверждают влияние остаточных напряжений и граничных условий на работу устройств. Результаты

подтверждают необходимость выбора материалов брэгговского отражателя для повышения чувствительности и перспективность применения ОАВ-резонаторов в составе микроэлектронных газовых сенсоров.

Ключевые слова: объемная акустическая волна, брэгговский отражатель, тонкопленочный резонатор, сенсор, иммобилизация, чувствительный слой.

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер регистрации проекта 124022500291-6).

Автор для переписки: Улаева Татьяна Николаевна, tanskaya-89@mail.ru

Введение

Мониторинг качества атмосферного воздуха и оперативное выявление утечек технологических газов остаются ключевыми задачами промышленной безопасности и экологии. Для их решения требуются сенсорные системы с высокой чувствительностью, селективностью и стабильностью в широком диапазоне условий эксплуатации, при этом совместимые с микроэлектронными технологиями и пригодные для массового производства [1-3]. Среди таких систем особое место занимают тонкопленочные резонаторы на объемных акустических волнах (ОАВ), включая конструкции с брэгговским отражателем и мембранного типа. ОАВ-резонаторы способны фиксировать даже незначительные изменения в составе атмосферы, что делает их незаменимыми в системах мониторинга качества воздуха.

Газовые сенсоры на основе ОАВ-резонаторов могут быть легко интегрированы в современные системы мониторинга, что упрощает их внедрение и эксплуатацию. Это особенно важно в условиях быстрого развития промышленности и увеличения антропогенного воздействия на окружающую среду [4]. Кроме того, такие сенсоры способствуют развитию интеллектуальных систем управления. Актуальность их использования обусловлена возрастающей потребностью в достоверном контроле состояния окружающей среды [1].

Одной из надежных и эффективных конструкций резонаторов является ОАВ-резонатор с брэгговским отражателем, обладающий высокой механической

прочностью, температурной стабильностью и низкой чувствительностью к механическим воздействиям [5-7].

Конструкция ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем и нанесенным чувствительным слоем приведена на рис. 1.

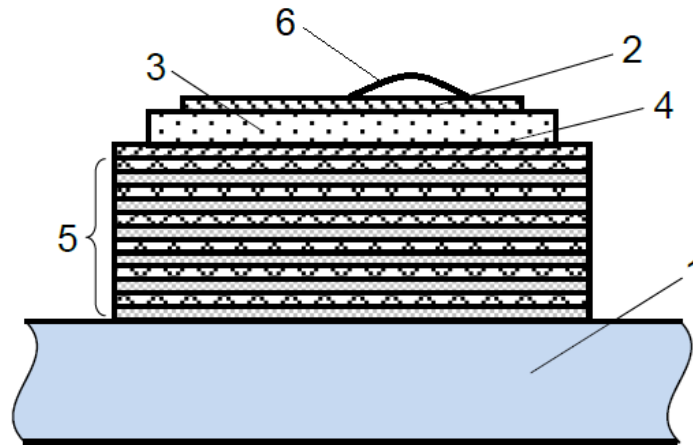


Рис. 1. Конструкция микроэлектронного газового сенсора на основе ОАВ-резонатора: 1 – подложка, 2 – верхний электрод, 3 – пьезоэлектрический слой, 4 – нижний электрод, 5 – брэгговский отражатель, 6 – чувствительный материал.

Путем последовательного нанесения тонкопленочных слоев методом магнетронного распыления на подложке формируется брэгговский отражатель, пьезоэлектрический слой и электроды. Для создания газового сенсора на поверхность верхнего электрода резонатора наносится чувствительный материал, реагирующий на изменения в составе атмосферы [8,9]. Этот материал может включать различные химические соединения, обладающие высокой селективностью к конкретным газам. При взаимодействии с анализируемым газом изменяется резонансная частота резонатора, что позволяет регистрировать наличие и концентрацию целевых веществ.

Целью данной работы является сравнительный анализ электрических характеристик ОАВ-резонатора с различными брэгговскими отражателями до и после нанесения чувствительного слоя. Исследование направлено на оценку влияния иммобилизации чувствительного материала на ключевые параметры резонатора, такие как резонансная частота, добротность и импедансные характеристики.

1. Выбор метода иммобилизации и материала для чувствительного слоя

В данной работе под иммобилизацией подразумевается процесс надежного закрепления чувствительного материала на поверхности верхнего электрода ОАВ-резонатора [10]. От качества закрепления напрямую зависят стабильность, чувствительность устройства и повторяемость результатов.

К методу иммобилизации предъявляют следующие требования:

- устойчивость материала к внешним температурным, химическим и механическим воздействиям;
- сохранение чувствительных свойств к искомым газам или группе газов;
- отсутствие дополнительного шунтирования электродов, значительных механических напряжений в резонаторной структуре и заметного ухудшения добротности;
- воспроизводимость технологии нанесения чувствительного слоя.

Выбор метода иммобилизации определяется рядом факторов, которые необходимо учитывать для обеспечения эффективной работы ОАВ-резонатора [11]. К ним относятся:

1) Материал чувствительного слоя. В зависимости от исследуемой газовой среды могут использоваться различные материалы, такие как неорганические оксиды металлов (например, SnO_2 , ZnO и другие), проводящие полимеры (полианилин, полипиррол и другие) или гибридные нанокompозиты (углеродные нанотрубки, графеновые слои и другие).

2) Совместимость чувствительного материала с поверхностью электрода, на которую он наносится. Чаще всего чувствительный слой наносят на поверхность верхнего электрода ОАВ-резонатора, сформированного из тонких пленок металлов, таких как золото, платина, алюминий, молибден и другие. Технология нанесения чувствительного слоя должна учитывать химическую активность материала электрода, чтобы не нарушать многослойную структуру ОАВ-резонатора и не влиять на его работу.

3) Температурный режим обработки. Некоторые методы требуют термической обработки при высоких температурах, что может ухудшать

кристаллические и пьезоэлектрические свойства нитрида алюминия или других функциональных пленок и вызывать расслоение многослойной структуры ОАВ-резонатора.

4) Толщина и равномерность. При нанесении чувствительного слоя на верхний электрод происходит увеличение нагрузки на резонатор. Слишком толстый чувствительный слой может «заглушить» акустические волны и ухудшить добротность резонатора. Неравномерность слоя может привести к дополнительной фазовой неустойчивости и изменению характеристик ОАВ-резонатора. Оптимальной считается толщина слоя в диапазоне 100-1000 нм, обеспечивающая нужную чувствительность без существенного влияния на акустические свойства резонатора

5) Адгезия и стабильность в рабочей среде. Рабочая газовая среда может содержать агрессивные компоненты, такие как повышенная влажность, коррозионные газы и другие агрессивные вещества, которые могут негативно влиять на адгезию, а, следовательно, на характеристики устройства при эксплуатации. При недостаточной адгезии чувствительного слоя происходит его частичное или полное отслаивание от поверхности резонатора, что ухудшает чувствительность к газовой среде, а в ряде случаев способствует выходу из строя газового сенсора. Здесь также имеют место поверхностное натяжение и капиллярные эффекты при конденсации.

В современной науке существует множество методов иммобилизации чувствительного слоя на поверхности ОАВ-резонатора: центрифугирование, капельное нанесение, струйная печать, погружение, метод послойной сборки и другие [11-14]. Эти методы различаются по сложности, точности и эффективности.

Метод центрифугирования позволяет контролировать толщину, но плохо подходит для локального нанесения и малых площадей. Струйная печать является перспективным методом, обеспечивающим точное дозирование, но требует специального состава чернил и тонкой калибровки. Метод погружения прост в реализации, но часто приводит к формированию чрезмерной

толщины покрытия. Метод послойной сборки обеспечивает нанометрический контроль, но требует многократных циклов, что снижает производительность. Метод капельного нанесения отличается технологической простотой и возможностью локального нанесения, что делает его подходящим для проведения научных исследований. Недостаток метода – неоднородность наносимого слоя.

Учитывая указанные требования к методам иммобилизации, для проведения данного исследования был выбран метод капельного нанесения чувствительного слоя. Он не требует дорогостоящего оборудования, легко реализуется в лабораторных условиях, совместим с чувствительными материалами, а также позволяет нанести раствор (чувствительный слой) строго в пределах активной области резонатора. Отметим, что перед нанесением слоя поверхность электрода подвергается плазменной или термической обработке для улучшения смачивания и повышения адгезии.

В качестве чувствительного слоя предложено использовать позитивный фоторезист. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, простотой нанесения и совместимостью с методом капельного нанесения. Во-вторых, он имеет чувствительность к ряду органических растворителей и газов, включая ацетон, этанол, аммиак, формальдегид, пары воды и другие летучие органические соединения [14,15]. В-третьих, изменяемость диэлектрических и механических параметров фоторезиста при сорбции влияет на параметры резонатора, в первую очередь, на сдвиг резонансной частоты и добротность.

Исследования показывают, что фоторезистивные пленки способны поглощать влагу и органические соединения, приводя к изменению массы, упругих свойств и электрической проницаемости [14,15]. Эти эффекты могут быть использованы для создания чувствительного слоя сенсоров. В работе [15] также показано, что подобные полимерные покрытия применяются в составе чувствительных слоев в резонансных структурах, включая датчики влажности и газа на основе объемных и поверхностных акустических волн.

Таким образом, выбор фоторезиста как чувствительного материала в сочетании с методом капельного нанесения представляется обоснованным с технологической и прикладной точек зрения. Это решение соответствует требованиям, предъявляемым к разработке чувствительных элементов для газовых сенсоров, построенных на основе тонкопленочных ОАВ-резонаторов.

2. Методика эксперимента

Для проведения эксперимента были изготовлены методом магнетронного распыления образцы тонкопленочных ОАВ-резонаторов двух типов.

1) Первая конструкция включала пьезоэлектрический преобразователь на основе пленки нитрида алюминия с алюминиевыми электродами и брэгговский отражатель, сформированный из трех пар чередующихся слоев молибдена и алюминия, дополненных одной парой слоев молибдена и диоксида кремния (Al-Mo-SiO₂).

2) Вторая конструкция имела аналогичный преобразователь, но брэгговский отражатель формировался из шести пар чередующихся слоев молибдена и титана (Mo-Ti).

Технология изготовления ОАВ-резонаторов подробно описана авторами ранее [16-18]. Помимо различий в конструкционном составе слоев брэгговского отражателя, важным отличием исследованных конструкций является их температурный коэффициент частоты (ТКЧ). Резонаторы с брэгговским отражателем Al-Mo-SiO₂ демонстрируют частичную термокомпенсацию, поскольку расчетное значение ТКЧ для изготовленных образцов составляет $-18 \cdot 10^{-6} \text{ 1 / } ^\circ\text{C}$. В то же время резонаторы с брэгговским отражателем Mo-Ti характеризуются более высоким значением ТКЧ, равным $-76 \cdot 10^{-6} \text{ 1 / } ^\circ\text{C}$, что свидетельствует об их большей чувствительности к температурным воздействиям.

В качестве чувствительного слоя был выбран позитивный фоторезист марки ФП-383. Выбор обоснован высокой адгезией к металлическим поверхностям, минимальными требованиями подготовки поверхности, высокой вязкостью, стабильными механическими и диэлектрическими свойствами.

Фоторезист был локально нанесен капельным методом на поверхность верхнего электрода ОАВ-резонатора, что позволило проводить последующие измерения. Образец с нанесенным фоторезистом выдерживался в термошкафе при температуре 60 °С в течение 3 часов для отверждения и повышения адгезии к резонатору. После сушки образец выдерживался в нормальных условиях в течение 30 минут для стабилизации параметров. Для данного эксперимента использовались несколько образцов ОАВ-резонаторов с нанесенным фоторезистивным слоем.

Электрические характеристики образцов резонаторов до и после нанесения чувствительного слоя измерялись при помощи векторного анализатора электрических цепей E5071C Agilent Technologies при фиксированных калибровочных параметрах.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В данной работе рассматривается влияние чувствительного слоя на характеристики ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем. На рисунках 2-4 показаны измеренные частотные зависимости модуля электрического импеданса, активной проводимости и коэффициента отражения по мощности S_{11} ОАВ-резонатора до и после нанесения чувствительного слоя, соответственно. Основные параметры резонаторов представлены в таблице.

Анализ полученных экспериментальных данных по влиянию чувствительного слоя на ОАВ-резонатор с брэгговским отражателем на основе Al-Mo-SiO₂ позволяет сделать вывод о том, что наличие чувствительного слоя незначительно влияет на частоту последовательного резонанса, что согласуется с результатами работы [19]. В то же время значение частоты параллельного резонанса снизилось на 1,68 МГц, что может быть связано с влиянием фоторезиста на условия распространения объемной акустической волны в резонаторе. Наличие чувствительного слоя привело к уменьшению разницы между значениями электрических импедансов на 2,37 Ом на частотах последовательного и параллельного резонансов и уменьшению резонансного

промежутка резонатора на 15 %. Добротность устройства незначительно увеличилась, что может быть связано с дополнительной стабилизацией верхнего электрода. Кроме того, наблюдается снижение значения максимальной проводимости на частоте последовательного резонанса на 27 %, что свидетельствует о вероятном увеличении диэлектрических или акустических потерь. Повышение коэффициента отражения по мощности S_{11} на 21 % также указывает на изменение входного импеданса резонатора.

Таблица. Измеренные электрические параметры ОАВ-резонаторов с разными брэгговскими отражателями до и после нанесения чувствительного слоя.

Электрические параметры резонатора		Структура брэгговского отражателя			
		Ti-Mo		Al-Mo-SiO ₂	
		Без чувствительного слоя	С чувствительным слоем	Без чувствительного слоя	С чувствительным слоем
Частота последовательного резонанса, ГГц		4,14531	4,18344	3,87153	3,87153
Частота параллельного резонанса, ГГц		4,16375	4,19125	3,88306	3,88138
Резонансный промежуток, МГц		18,44	7,81	11,53	9,85
Электрический импеданс на частоте последовательного резонанса, Ом		2,23	5,11	4,98	6,09
Электрический импеданс на частоте параллельного резонанса, Ом		23,62	14,80	15,06	13,80
Добротность		455,9	622,3	442	450
Активная проводимость на частоте последовательного резонанса, мСм		428,75	170,3	144	105
Коэффициент отражения по мощности на частоте последовательного резонанса, дБ		-8,41	-4,30	-3,88	-3,05
Эквивалентные электрические параметры	Статическая емкость, пФ	7,209	7,160	6,816	6,812
	Динамическая емкость, фФ	64,27	26,77	40,66	34,71
	Динамическая индуктивность, нГн	22,94	54,07	41,56	48,69
	Динамическое сопротивление, Ом	517,66	302,47	258,68	224,81

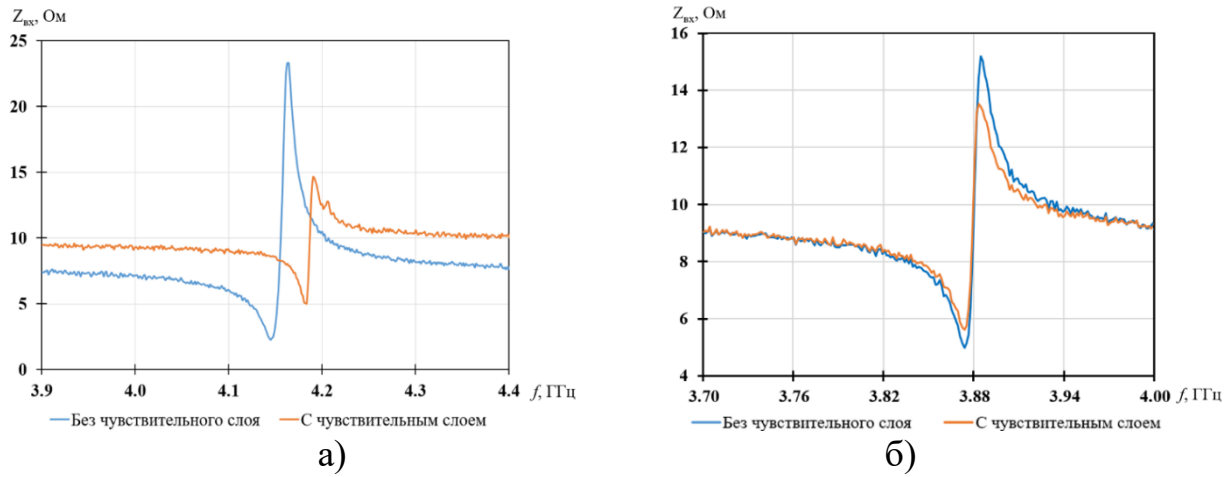


Рис. 2. Частотная зависимость модуля электрического импеданса ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе Mo-Ti (а) и Al-Mo-SiO₂ (б) до и после нанесения чувствительного слоя.

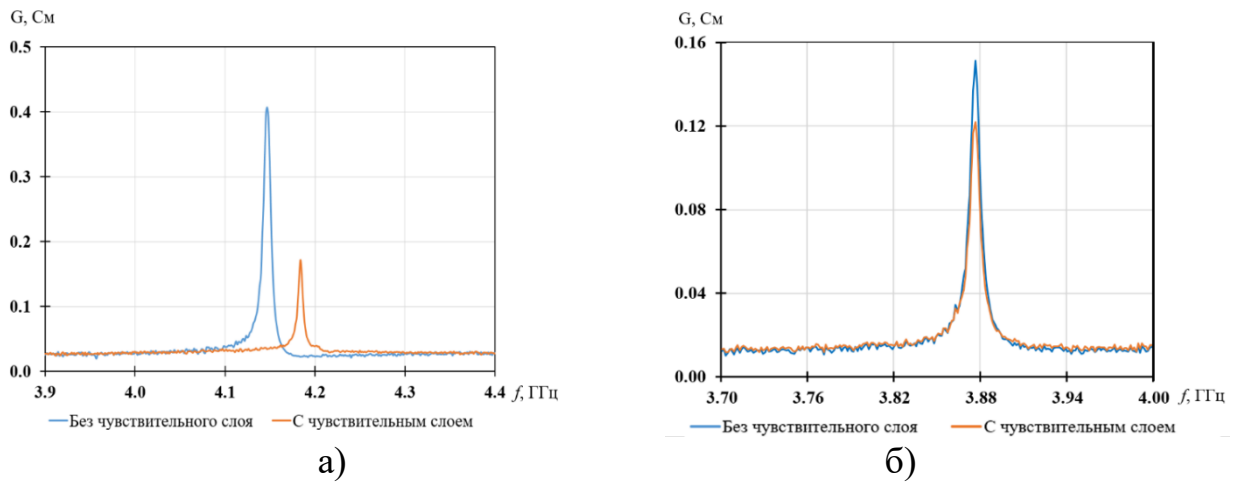


Рис. 3. Частотная зависимость активной проводимости ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе Mo-Ti (а) и Al-Mo-SiO₂ (б) до и после нанесения чувствительного слоя.

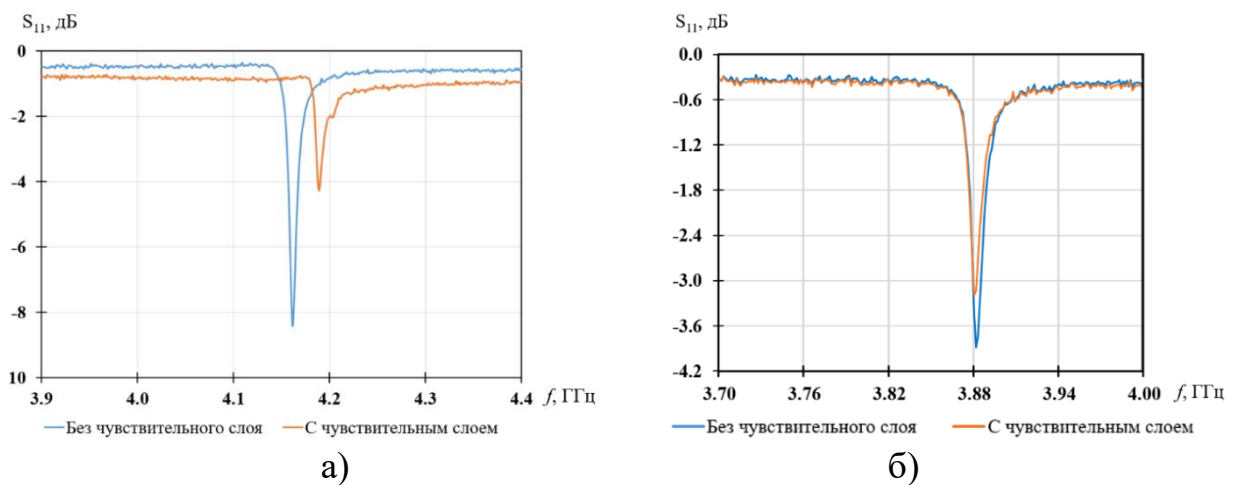


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе Mo-Ti (а) и Al-Mo-SiO₂ (б) до и после нанесения чувствительного слоя.

Для ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем на основе пленок Mo-Ti картина изменений после нанесения чувствительного слоя носит ярко выраженный и во многих отношениях показательный характер. Прежде всего происходит повышение частоты последовательного резонанса на 38,13 МГц и частоты параллельного резонанса на 27,5 МГц. Такой сдвиг частот при нанесении органического покрытия принципиально важен: при учете только гравиметрического эффекта добавленного слоя частота резонанса должна уменьшиться, но наблюдается противоположное. Следовательно, в данном случае доминирует не масса, а изменение граничного условия и эффективной жесткости верхней границы, в том числе через сдвиговую упругость и возможные остаточные напряжения после сушки фоторезиста. Полученные результаты согласуются с результатами работы [20].

При нанесении чувствительного слоя наблюдается уменьшение резонансного промежутка более чем в 2 раза. В импедансных характеристиках наблюдаются следующие изменения. На последовательном резонансе импеданс увеличился в 2 раза. На параллельном резонансе импеданс, напротив, уменьшился в 1,6 раза. При этом добротность резонатора увеличилась в 1,4 раза.

Для активной проводимости на частоте последовательного резонанса наблюдается резкое падение примерно в 2,5 раза, а также для коэффициента отражения по мощности наблюдается уменьшение провала на частоте последовательного резонанса. Динамическая емкость уменьшилась в 2,4 раза, динамическая индуктивность увеличилась в 2,4 раза, динамическое сопротивление уменьшилось в 1,7 раза.

Таким образом, резонатор с брэгговским отражателем на основе пленок Mo-Ti демонстрирует ожидаемые сдвиги частотных характеристик, а значения эквивалентных электрических параметров подтверждают, что в данном случае наблюдаются не артефакты измерения, а физическое преобразование акустической ветви при смене граничного условия.

Статическая емкость ОАВ-резонаторов в обоих случаях практически не изменилась. Это можно объяснить сохранением основных геометрических

размеров тонкопленочных электродов и пьезоэлектрического слоя, а чувствительный слой не вносит существенного влияния в статическую емкость.

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ характеристик ОАВ-резонаторов с брэгговскими отражателями на основе Mo-Ti и Al-Mo-SiO₂ до и после нанесения чувствительного слоя. Результаты показали, что характер влияния чувствительного слоя существенно зависит от материала брэгговского отражателя, и, как следствие, от конструкционных параметров резонатора.

Для резонаторов с отражателем Al-Mo-SiO₂ нанесение чувствительного слоя привело к минимальному изменению частотных характеристик и сохранению добротности на исходном уровне. Такая стабильность объясняется не только особенностями многослойной структуры, но и относительно низким значением температурного коэффициента частоты ($-18 \cdot 10^{-6} \text{ 1 / }^{\circ}\text{C}$), обеспечивающим частичную термокомпенсацию. Снижение активной проводимости отражает рост диэлектрических потерь в чувствительном слое.

В случае резонаторов с брэгговским отражателем на основе Mo-Ti наблюдались выраженные изменения частотных характеристик, включая сдвиг последовательного и параллельного резонансов в область более высоких частот. Этот сдвиг объясняется изменением граничной жесткости и остаточными напряжениями в полимерном покрытии. Резонансный промежуток значительно уменьшился, что отражает перестройку акустического спектра структуры. Добротность увеличилась более чем на 35 %, что указывает на дополнительную стабилизацию акустической системы. Эквивалентные электрические параметры подтвердили физическую природу изменений, включая снижение динамической емкости и рост динамической индуктивности. Важным фактором остается высокий по модулю температурный коэффициент частоты ($-76 \cdot 10^{-6} \text{ 1 / }^{\circ}\text{C}$), который определяет повышенную чувствительность таких структур к температурным воздействиям. Несмотря на меньшую термостабильность, подобные резонаторы обладают высокой чувствительностью и способны

регистрировать малые изменения параметров среды, что открывает перспективы для разработки высокочувствительных сенсорных устройств.

Статическая емкость при этом практически не изменилась, что демонстрирует сохраняемость геометрической конфигурации резонаторов.

Полученные результаты подтверждают возможность управления свойствами ОАВ-резонатора за счет подбора конструкционных материалов брэгговского отражателя. Использование фоторезиста в качестве чувствительного слоя продемонстрировало технологическую простоту и совместимость с микроэлектронным процессом.

В целом работа показала перспективность тонкопленочных ОАВ-резонаторов для применения в газовых сенсорах.

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер регистрации проекта 124022500291-6).

Литература

1. Carmona-Cejas J. M. et al. AlN-based solid mounted resonators functionalized with WO₃ films for NO detection //Sensors and Actuators A: Physical. – 2025. – Т. 386. – С. 116355. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116355>
2. Esfahani S. et al. Indoor Air Quality CO₂ Thermally Modulated SMR Sensor //Proceedings. – MDPI, 2024. – Т. 97. – №. 1. – С. 143. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024097143>
3. Pareek D. et al. Bulk acoustic wave resonators for sensing applications: A review //Sensors and Actuators A: Physical. – 2024. – Т. 378. – С. 115839. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115839>
4. Wang Z. et al. Investigation of sorptive interactions between volatile organic compounds and supramolecules at dynamic oscillation using bulk acoustic wave resonator virtual sensor arrays //Microsystems & Nanoengineering. – 2024. – Т. 10. – №. 1. – С. 99. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00729-x>
5. Liu Y. et al. Materials, design, and characteristics of bulk acoustic wave resonator: A review // Micromachines. – 2020. – Т. 11. – №. 7. – С. 630. <https://doi.org/10.3390/mi11070630>
6. Liang X. et al. Mechanically driven solidly mounted resonator-based nanoelectromechanical systems magnetoelectric antennas //Advanced Engineering Materials. – 2023. – Т. 25. – №. 21. – С. 2300425. <https://doi.org/10.1002/adem.202300425>
7. Bai X. et al. The thin film bulk acoustic wave resonator based on single-crystalline 43° Y-cut lithium niobate thin films //Aip Advances. – 2020. – Т. 10. – №. 7. <https://doi.org/10.1063/1.5143550>
8. Richter D. et al. Integrated high temperature gas sensor system based on bulk acoustic wave resonators //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – Т. 118. – №. 1-2. – С. 466-471. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.04.041>

9. Zhao Y. et al. Advances in micro-and nano-scale resonant mass-sensitive gas sensors: Mechanisms, materials, functionalization and applications //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2025. – C. 137415. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.137415>
10. Zhang Y. et al. Film bulk acoustic resonators (FBARs) as biosensors: A review //Biosensors and Bioelectronics. – 2018. – T. 116. – C. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.05.028>
11. Oprea A., Weimar U. Gas sensors based on mass-sensitive transducers. Part 2: Improving the sensors towards practical application //Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2020. – T. 412. – №. 25. – C. 6707-6776. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02627-3>
12. Nordström M. et al. SU-8 cantilevers for bio/chemical sensing; fabrication, characterisation and development of novel read-out methods //Sensors. – 2008. – T. 8. – №. 3. – C. 1595-1612. <https://doi.org/10.3390/s8031595>
13. Berger C. M., Henderson C. L. The effect of humidity on water sorption in photoresist polymer thin films //Polymer. – 2003. – T. 44. – №. 7. – C. 2101-2108. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00079-X)
14. Memon M. M. et al. Surface acoustic wave humidity sensor: A review //Micromachines. – 2023. – T. 14. – №. 5. – C. 945. <https://doi.org/10.3390/mi14050945>
15. Xuan W. et al. A film bulk acoustic resonator oscillator based humidity sensor with graphene oxide as the sensitive layer //Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2017. – T. 27. – №. 5. – C. 055017. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aa654e>
16. Torgash T. N. et al. Investigation of Temperature Effect on Electrical Characteristics of Solidly Mounted Resonator //2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2022. – C. 1-4. <https://doi.org/10.1109/WECONF55058.2022.9803482>

17. Улаева Т.Н. и др. / 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. – Т. 18, № 11. – С. 4-13. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-11-4-13>
18. Ulaeva T. N. et al. 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). – IEEE, 2024. – С. 1-5. <https://www.doi.org/10.1109/WECONF61770.2024.10564673>
19. Zhu Y. et al. Polyimide-based high-performance film bulk acoustic resonator humidity sensor and its application in real-time human respiration monitoring //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 5. – С. 758. <https://doi.org/10.3390/mi13050758>
20. Wang L. et al. Multi-DoF AlN-on-SOI BAW MEMS resonators with coated ZIF-8 for gas sensing application //Microsystems & Nanoengineering. – 2025. – Т. 11. – №. 1. – С. 69. <https://doi.org/10.1038/s41378-025-00917-3>

Для цитирования:

Жилин Н.М., Улаева Т.Н., Чириков Н.А., Щекатурова В.Н., Кузнецов А.Н. Исследование влияния иммобилизации чувствительного слоя на электрические характеристики тонкопленочного ОАВ-резонатора от конструктивных параметров. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.1>