



АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОАВ-РЕЗОНАТОРА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИММОБИЛИЗОВАННОГО СЛОЯ

Авторы:

Жилин Н.М., м.н.с. ИРФЭ ОНЦ СО РАН, сотрудник ОНИИП, аспирант ОмГУ

Улаева Т.Н., с.н.с. ИРФЭ ОНЦ СО РАН, сотрудник ОНИИП, доцент ОмГУ

Чириков Н.А., м.н.с. ИРФЭ ОНЦ СО РАН, сотрудник ОНИИП

Щекатурова В.Н., студентка ОмГУ

Кузнецов А.Н., инженер ИРФЭ ОНЦ СО РАН, сотрудник ОНИИП

Введение

Мониторинг качества воздуха и оперативное выявление утечек технологических газов - ключевые задачи экологии и промышленной безопасности. 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.

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.

Микроэлектронный газовый сенсор на основе ОАВ-резонатора

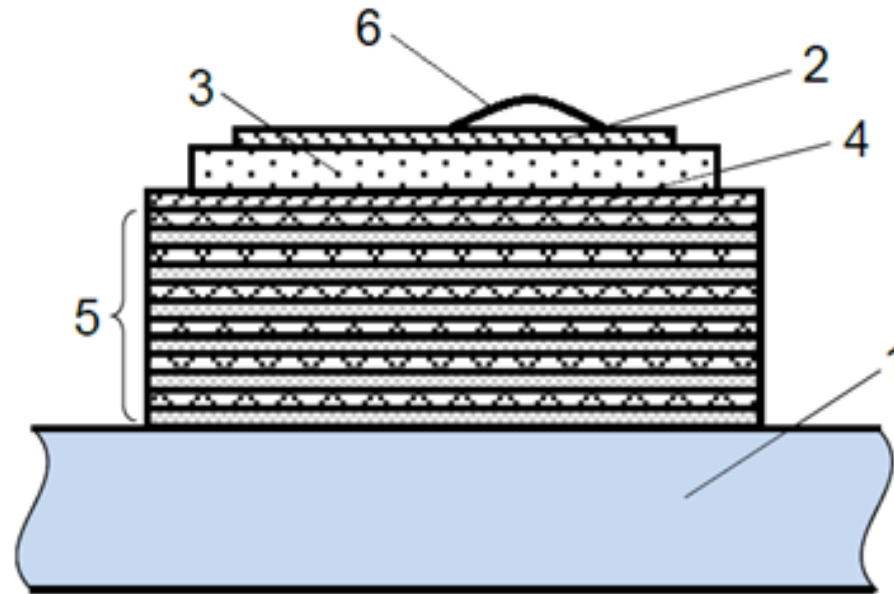


Рис. 1. Конструкция микроэлектронного газового сенсора на основе ОАВ-резонатора: 1 – подложка, 2 – верхний электрод, 3 – пьезоэлектрический слой, 4 – нижний электрод, 5 – брэгговский отражатель, 6 – чувствительный материал.

Выбор метода иммобилизации и материала для чувствительного слоя

Выбор метода иммобилизации

Требования: стабильность, сохранение чувствительности, адгезия.

Рассмотренные методы: центрифугирование, погружение, струйная печать, капельное нанесение.

Выбор: капельное нанесение (простота, локальность).

Выбор материала

Использован позитивный фоторезист ФП-383.

Причины выбора:

- совместимость с капельным нанесением;
- чувствительность к органическим соединениям (ацетон, аммиак и др.);
- изменение диэлектрических и механических свойств влияет на резонанс.

Методика эксперимента

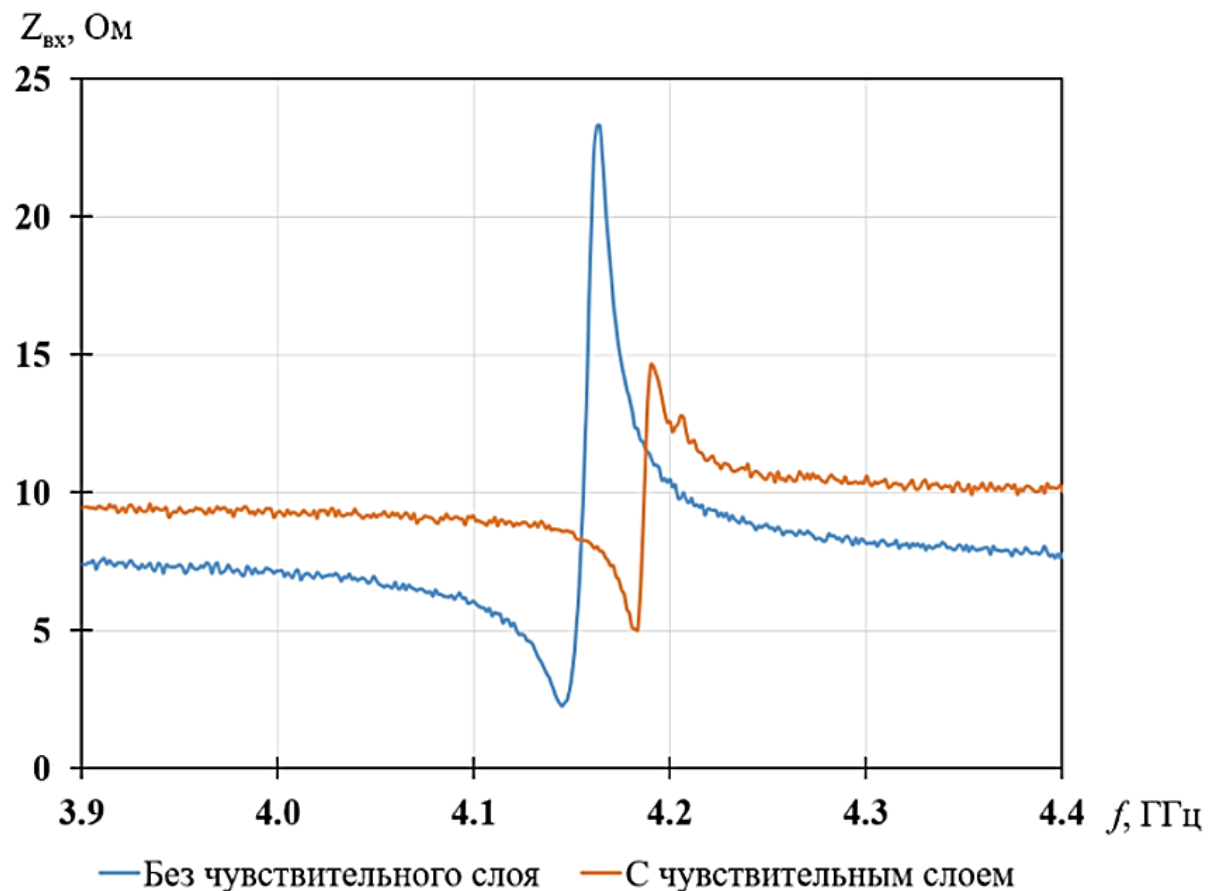
Изготовлены два типа ОАВ-резонаторов:

- 1) Al-Mo-SiO₂ (термокомпенсация, ТКЧ = $-18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).
- 2) Mo-Ti (ТКЧ = $-76 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

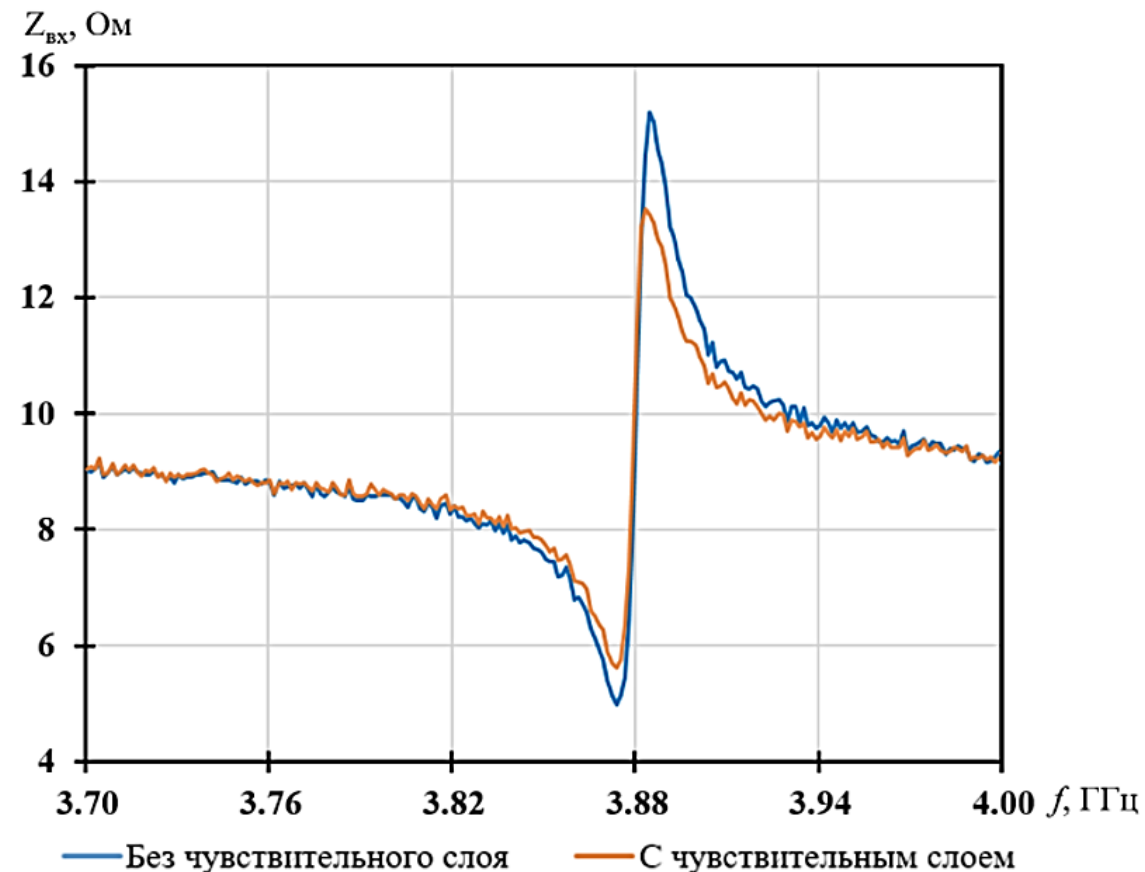
Нанесение фоторезиста капельным методом → сушка → стабилизация.

Измерения: векторный анализатор электрических цепей Agilent E5071C.

Экспериментальные результаты



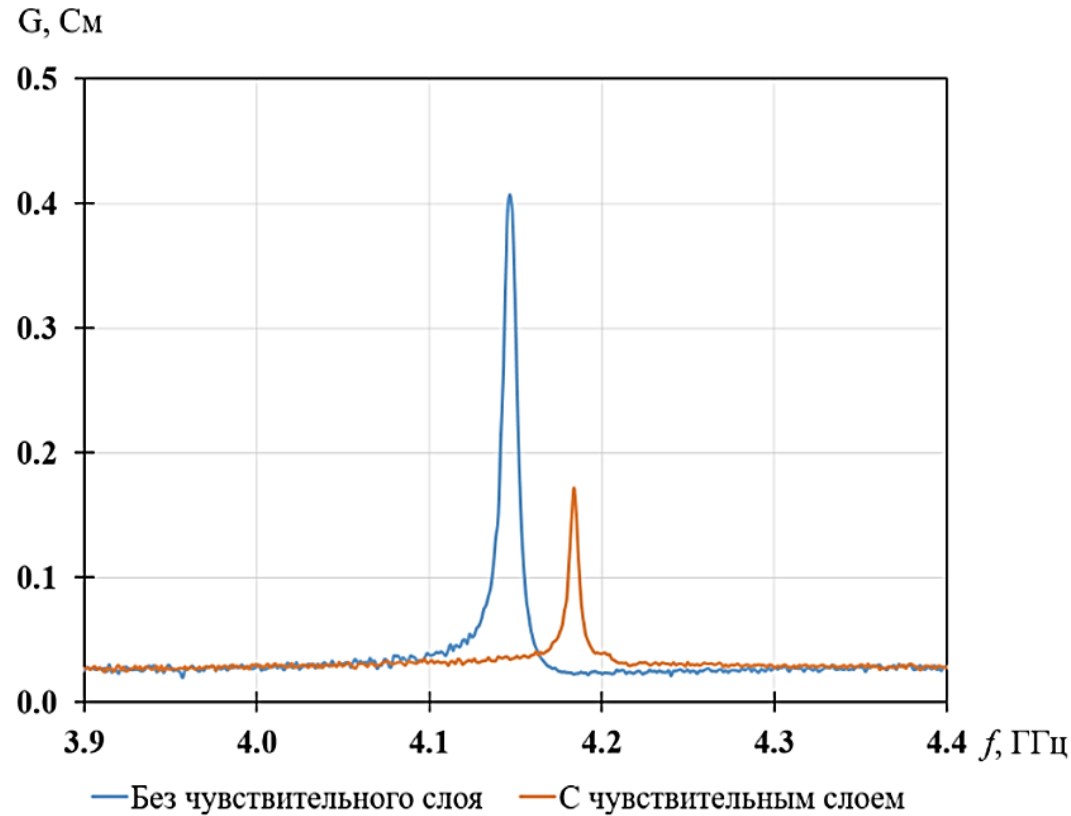
а)



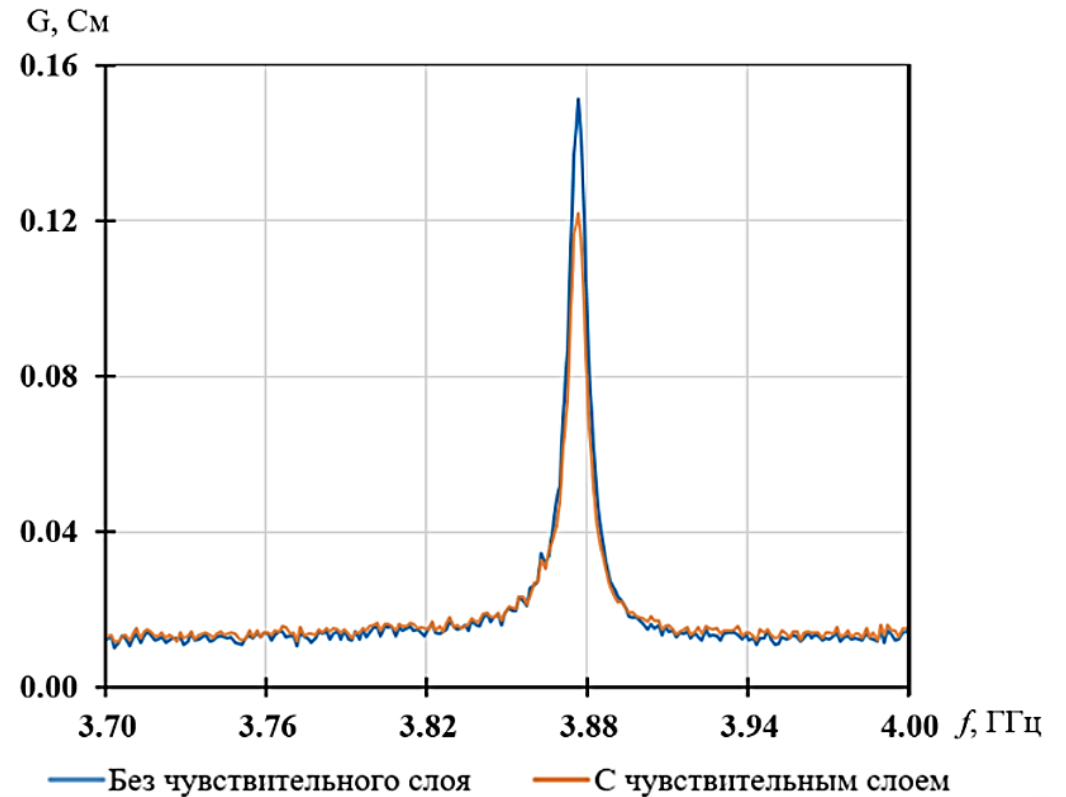
б)

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.

Экспериментальные результаты



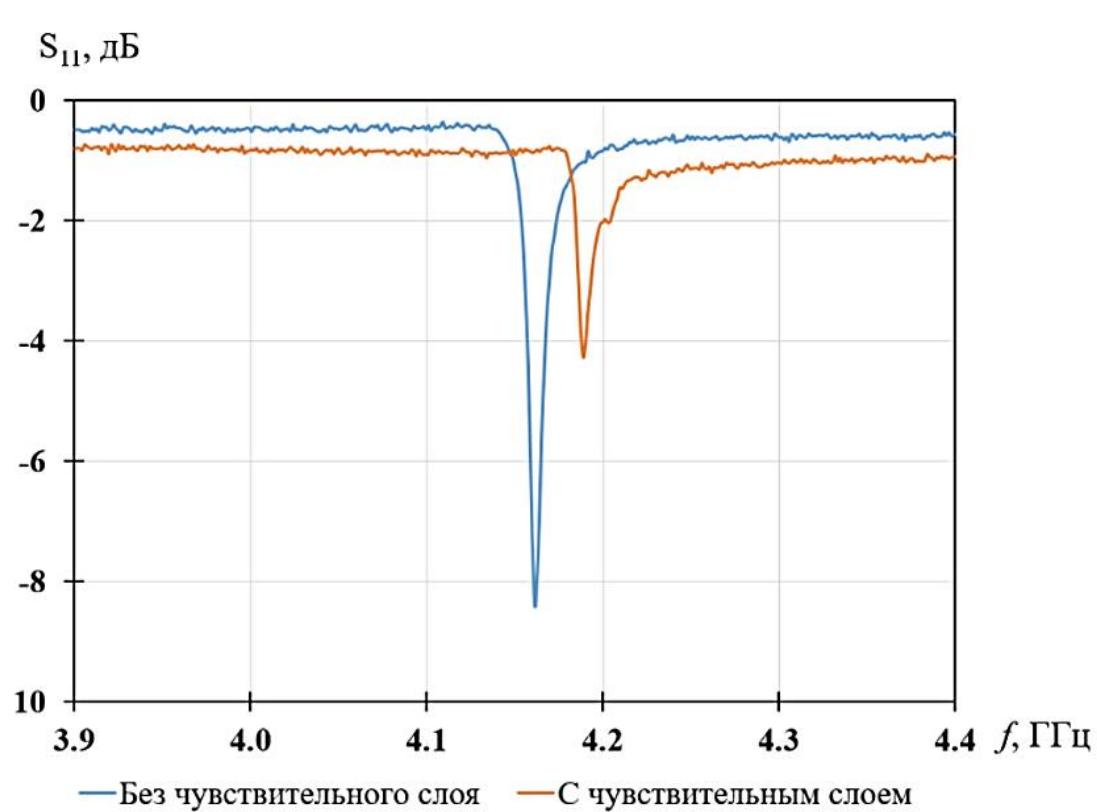
а)



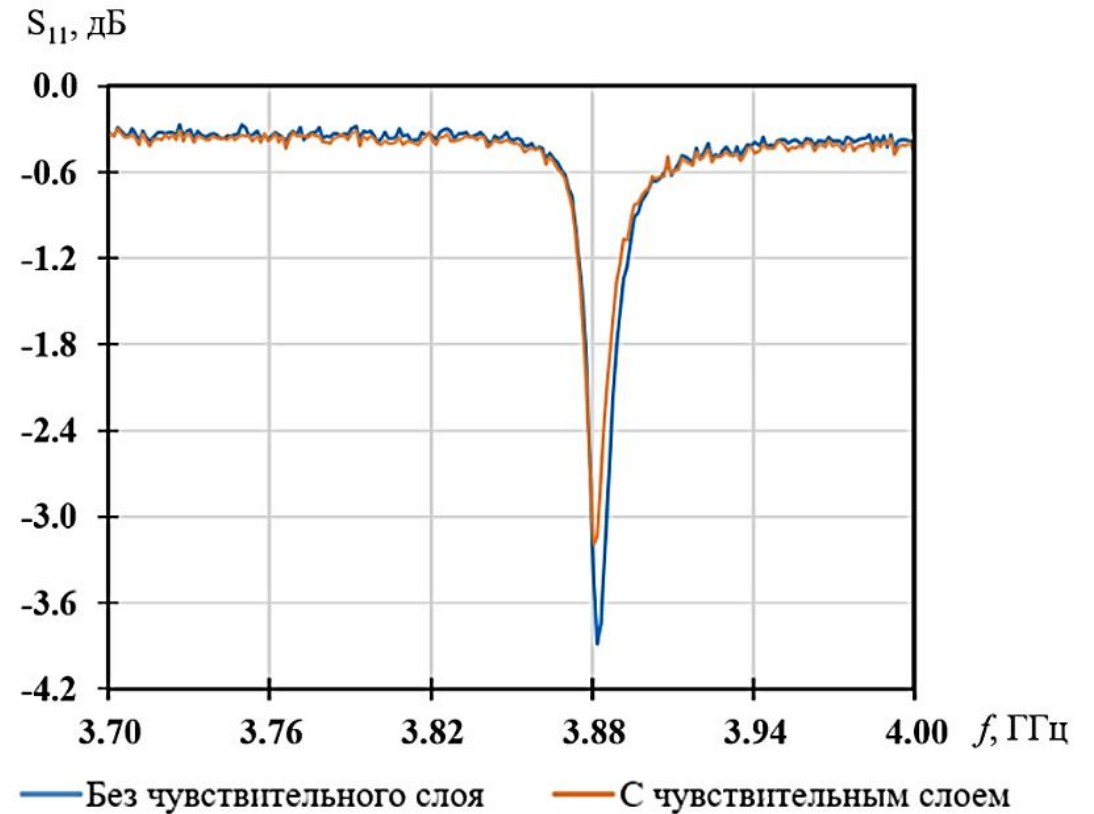
б)

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.

Экспериментальные результаты



а)



б)

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.

Экспериментальные результаты

Таблица 1. 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 последовательной частоте, 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

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 отражателя, и, как следствие, от конструктивных параметров резонатора.

Для резонаторов с отражателем Al-Mo-SiO₂ нанесение чувствительного слоя привело к минимальному изменению частотных характеристик и сохранению добротности на исходном уровне.

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. Резонансный промежуток значительно уменьшился.

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

Используемая литература

1. J.M. Carmona-Cejas et al., "AlN-based solid mounted resonators functionalized with WO₃ films for NO detection", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 386, 116355, 2025.
2. Esfahani S, Dawson T, Wojcik BU, Cole M, Gardner JW. Indoor Air Quality CO₂ Thermally Modulated SMR Sensor. *Proceedings*. 2024; 97(1):143.
3. Vinita, Deepak Pareek, Sk. Masiul Islam, Jitendra Singh, Bulk acoustic wave resonators for sensing applications: A review, *Sensors and Actuators A*, Vol. 378, 2024, 115839
4. Wang, Z. et al. Investigation of sorptive interactions between volatile organic compounds at dynamic oscillation using BAW sensor arrays. *Microsyst* 10, 99 (2024).
5. Y. Liu, Y. Cai, Y. Zhang, A. Tovstopyat, S. Liu and C. Sun, "Materials, Design and Characteristics of BAW Resonator: A Review," *Micromachines*, vol. 11, 630 (26 p.), 2020.
6. X. Liang et al., "Mechanically Driven Solidly Mounted Resonator-Based Nanoelectromechanical Systems Magnetolectric Antennas," *Engin. Materials*, vol. 25, (11 p.), 2023.
7. X. Bai et al., "The thin film bulk acoustic wave resonator based on single-crystalline 43°Y-cut lithium niobate thin films," *AIP Advances*, vol. 10, 075002 (5 p.), 2020.
8. D. Richter, et al., "Integrated high temperature gas sensor system based on BAW resonators", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 118, Iss. 1–2, pp. 466-471, 2006.
9. Y. Zhao, Z. et al., "Advances in micro- and nano-scale resonant mass-sensitive gas sensors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 431, Iss. 137415, 2025.
10. Y. Zhang, J. Luo, A.J. Flewitt, et al., "Film bulk acoustic resonators (FBARs) as biosensors: A review", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 116, pp. 1-15, 2018.
11. A. Oprea and U. Weimar, "Gas sensors based on mass-sensitive transducers. Part 2", *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 412, pp. 6707–6776, 2020.
12. M. Nordström et al., "SU-8 Cantilevers for Bio/chemical Sensing; Fabrication, Characterisation", *Sensors*, vol. 8, pp. 1595-1612, 2008.
13. C.M. Berger, C.L. Henderson, "The effect of humidity on water sorption in photoresist polymer thin films", *Polymer*, vol. 44, Iss. 7, pp. 2101-2108, 2003.
14. M.M. Memon, Q. Liu, A. Manthar, T. Wang and W. Zhang, "Surface Acoustic Wave Humidity Sensor: A Review", *Micromachines*, vol. 14, Iss. 945, pp. 1-19, 2023.
15. W. Xuan et al., "A film BAW resonator oscillator based humidity sensor with graphene oxide as the sensitive layer", *Jour. of Microm. and Microeng.*, vol. 27, pp. 1-8, 2017.
16. T. N. Torgash et al., "Investigation of Temperature Effect on Electrical Characteristics of Solidly Mounted Resonator," 2022 WECONF, 2022.
17. Т. Н. Улаева, Н. А. Чириков, Н. М. Жилин [и др.] / Влияние конструктивных параметров Брэгговских отражателей на температурные зависимости резонансных характеристик микрoэлектронных ОАВ-резонаторов с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия // *T-Comm.* – 2024. – Т. 18, № 11. – С. 4-13.
18. T. N. Ulaeva et al., "A Study of a Temperature Effect on Characteristics of a Solidly Mounted Resonator Based on AlN, Al, Mo and Ti Thin Films," WECONF, 2024, pp. 1-5.
19. Y. Zhu et al., "Polyimide-Based High-Performance FBAR Humidity Sensor and Its Application in Real-Time Human Respiration Monitoring", *Micromac.*, vol. 13, 2022.
20. Wang, L., Wang, Y., Tietze, M. et al. Multi-DoF AlN-on-SOI BAW MEMS resonators with coated ZIF-8 for gas sensing application. *Microsyst Nanoeng* 11, 69 (2025).