

УДК 537.226.4

ФОРМИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО СЛОЯ ТИТАНА ДЛЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛАСТИЧНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

Артём Эдуардович Рабоконь⁽¹⁾, Иван Владиславович Артемьев⁽²⁾, Алексей Дмитриевич Купцов⁽³⁾

*Студент 3 курса⁽¹⁾, студент 4 курса⁽²⁾, аспирант 4 года⁽³⁾,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: С.В. Сидорова,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»*

Развитие носимой электроники и мягкой робототехники требует создания гибких датчиков давления, например, на основе сегнетоэлектрического композита, состоящего из частиц ВаТiО₃ в матрице силикона. Ключевой проблемой таких устройств является надёжность металлических электродов: медь обладает высокой электропроводностью и низкой стоимостью, однако склонна к окислению и демонстрирует слабую адгезию к эластичным подложкам, что приводит к образованию трещин и отслоению при механических деформациях [1, 2]. Возможным решением проблемы низкой адгезии меди к поверхности сегнетоэлектрического эластомера является формирование адгезионного подслоя титана с предварительной ионной обработкой поверхности эластомера [1, 3].

Целью работы является повышение адгезии металлических тонкопленочных слоев электродов для гибких датчиков давления.

Чувствительный элемент представляет собой композит ВаТiО₃/силикон (50% отвердителя) толщиной 0,4–0,5 мм. Технология включает в себя очистку эластомера в УЗВ (ацетон и изопропиловый спирт) при частоте колебаний 120 кГц, температура раствора 35 °С, время очистки 4 мин. Ионную обработку поверхности аргоном: время 45 с, давление $4,6 \cdot 10^{-2}$ Па, поток Ar 2 см³/мин, ток 30 мА, мощность 90 Вт, расстояние до образца 86 мм. Нанесение основного электрода Cu или электрода с подслоем Ti/Cu осуществляется методом магнетронного распыления при параметрах: давление 0,33 Па, поток Ar 50 см³/мин, ток 28 мА, мощность 60 Вт, расстояние до образца 81 мм. Толщина медного электрода 550 нм. Толщина подслоя титана 100 нм.

Электроды для гибкого датчика давления формировали на установке МВТУ-11-1МС, расположенной на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана в лаборатории «Нано- и микротехнологии».

Комплексная оценка качества нанесения пленки проводилась методами оптической микроскопии и измерения сопротивления пленки. Полученные изображения поверхности показали, что образцы без титанового подслоя демонстрируют сетку микротрещин в диапазоне длин от 100 мкм до 1 мм и шириной от 100 нм до 5 мкм, а также локальные отслоения медной пленки из-за внутренних растягивающих напряжений при осаждении.

Оценка проводимости электродов проведена методами постоянного тока (цифровой мультиметр) и импедансного анализа (LCR-метр). Наблюдаются локальные отслоения медной пленки при минимальном механическом контакте. Также установлено, что проводимость электродов носит нестабильный характер: измеренное сопротивление варьируется в пределах 0,26–0,90 Ом в зависимости от метода и точек контакта, причём при изменении расстояния между измерительными щупами изменение сопротивления

происходит непропорционально, что объясняется неоднородной структурой токопроводящего слоя: наличием пор и локальных оксидных включений, вследствие неравномерного окисления в атмосфере, а также микроотслоениями пленки из-за слабой адгезии покрытия к подложке – все эти дефекты нарушают сплошность проводящего пути, из-за чего электрический ток вынужден обходить препятствия, и сопротивление перестаёт линейно зависеть от расстояния между электродами.

Проведено сравнение качества сформированных электродов из меди с подслоем и без подслоя титана. Оценка функциональных характеристик таких электродов показала, что формирование подслоя титана повышает адгезионные свойства медного электрода, сформированного на поверхности эластичного материала (BaTiO_3 в матрице силикона).

В дальнейшей работе планируется получение серии образцов и подбор режимов для получения оптимального по функциональным, геометрическим и эксплуатационным характеристикам проводящего покрытия для электродов датчика давления.

Литература

1. Агафонов Д.В., Гурин С.А., Новичков М.Д., Рыжов А.А., Волков В.С., Шепелева А.Э. Исследование и разработка технологии синтеза напыления пьезоэлектрических тонких пленок BaTiO_3 для датчика быстропеременных и статических давлений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 3.2. С. 164–167. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.183.2322>.
2. Meisak D., Plyushch A., Kinka M., Baliunas S., Kalendra V., Schaefer S., Zarkov A., Selskis A., Banys J., Fierro V. Effect of Particle Size on the Origin of Electromechanical Response in BaTiO_3 /PDMS Nanogenerators // ACS Applied Electronic Materials. 2024. – Vol. 6, Iss. 10. – P. 7464–7474. – DOI: 10.1021/acsaelm.4c01333.
3. Xu Y., Yang S., Liu C., Wu H., Huang K., Xu W., Wang J., Ding Y. Enhancing Wearable Piezoelectric Sensors via Micro-textured P(VDF-TrFE)/ BaTiO_3 Nanofiber Mats for Physiological Monitoring // Sensors & Diagnostics. – 2025. – Vol. 5. – P. 122. – DOI: 10.1039/D5SD00175G.