

УДК 620.3:543.08

ИНТЕГРАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В МИКРОФЛЮИДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Жидких Иван Валерьевич ⁽¹⁾

Студент 4 курса ⁽¹⁾

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.Б. Цветков,

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Микрофлюидные устройства являются одной из наиболее перспективных платформ современной наноинженерии, поскольку позволяют работать с малыми объемами жидкости, точно управлять переносом вещества и совмещать на одном чипе несколько стадий анализа. Традиционные подходы, основанные на отборе проб и последующем анализе в начале и в конце процесса, по мере усложнения химических и биологических систем становятся менее эффективными. Они не позволяют в полной мере фиксировать промежуточные стадии реакции, кратковременные изменения состава среды и динамику протекания процессов. Именно поэтому развитие микрофлюидики все в большей степени связывают с переходом к непрерывному контролю параметров непосредственно в устройстве [1].

Ключевую роль в таком переходе играет интеграция функциональных наноматериалов в структуру микрофлюидного устройства [2]. Наноматериалы позволяют увеличить удельную площадь поверхности, улучшить перенос заряда, повысить каталитическую активность, усилить межфазное взаимодействие и стабилизировать чувствительный слой сенсора [3]. Благодаря этому микрофлюидная платформа перестает быть только системой транспорта жидкости и превращается в активное аналитическое устройство, способное регистрировать изменения параметров среды в ходе всего процесса.

Наиболее широко в микрофлюидике применяются электрические и электрохимические сенсоры, поскольку они совместимы с технологиями микро- и нанофабрикации, легко миниатюризируются и интегрируются в микроканалы. Принцип их работы основан на преобразовании химического или биологического взаимодействия в электрический сигнал: в амперометрических системах регистрируется ток окислительно-восстановительных реакций, в потенциометрических – разность потенциалов, а в кондуктометрических и импедансных – изменение проводимости или полного сопротивления среды [4]. Группа Л. Н. Фернандес Солис (Fernandez Solis LN) разработала микрофлюидный электрохимический иммуносенсор для определения микотоксина Т-2, в котором использована нанопористая золотая структура, декорированная графеном: золото увеличивает активную поверхность и облегчает иммобилизацию биослоя, а графен ускоряет перенос электронов и тем самым повышает чувствительность [5]. В других электрохимических микрофлюидных платформах применяют углеродные нанотрубки, металлические наночастицы и двумерные материалы, поскольку они улучшают проводимость, каталитическую активность и стабильность чувствительного слоя [6].

Отдельный интерес представляет импедансная сенсорика. Физическая основа метода заключается в том, что клетка, частица или изменение состава раствора меняет распределение электрического поля между электродами, вследствие чего изменяются

активная и реактивная составляющие импеданса [1]. В работе А. Ниараки (A. Niaraki) представлен датчик на основе графеновых микроэлектродов для мониторинга адгезии и цитотоксического ответа нейрональных клеток в реальном времени, выбор графена обусловлен его высокой электропроводностью, химической стабильностью и способностью эффективно взаимодействовать с клеточным слоем, что повышает чувствительность импедансных измерений [7].

Важное место занимают и оптические сенсоры, работа которых основана на регистрации поглощения, флуоресценции, рассеяния, изменения показателя преломления или плазмонного отклика. Для микрофлюидных систем особый интерес представляют волоконно-оптические, плазмонные и сенсоры на основе спектроскопии комбинационного рассеяния с поверхностным усилением [8, 9]. В работе группы М. К. Масуда (M.K. Masud) представлена SERS-микрофлюидная платформа для одновременного определения вирусных белков с использованием мезопористых золотых наночастиц, выбор которых обусловлен их развитой поверхностью и способностью эффективно усиливать локальное электромагнитное поле [9]. Для волоконно-оптических микрофлюидных сенсоров, характерно применение металлических нанопленок и наночастиц, повышающих чувствительность за счет поверхностного плазмонного резонанса [8].

Таким образом, интеграция функциональных наноматериалов в микрофлюидные устройства представляет собой не только направление совершенствования материалов, но и основу для создания встроенной сенсорики нового поколения. Именно наноматериалы обеспечивают увеличение активной поверхности, усиление сигнала и повышение чувствительности, что делает возможным непрерывный сбор данных в течение всего времени реакции [1, 6]. Наиболее перспективными представляются микрофлюидные платформы, в которых графен, углеродные нанотрубки, золотые наноструктуры и другие низкоразмерные материалы используются для реализации высокочувствительных электрохимических, импедансных и оптических сенсоров, работающих непосредственно в устройстве и в режиме реального времени [5, 7, 9].

Литература

1. *Ling, S., Xu, C., Jiang, Y. et al.* Toward continuous monitoring systems: emerging trends of on-chip sensors in organ-on-a-chip. *Microsyst Nanoeng* 12, 61 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41378-025-01142-8>
2. *Tian, Z.; Fu, Y.; Dang, Z.; Guo, T.; Li, W.; Zhang, J.* Utilizing Nanomaterials in Microfluidic Devices for Disease Detection and Treatment. *Nanomaterials* (2025). <https://doi.org/10.3390/nano15060434>
3. *Adam, H., Gopinath, S.C.B., Arshad, M.K.M. et al.* Integration of microfluidic channel on electrochemical-based nanobiosensors for monoplex and multiplex analyses: An overview. *J Taiwan Inst Chem Eng* 146, 104817 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104814>
4. *Mazzaracchio, V., Arduini, F.* Smart microfluidic devices integrated in electrochemical point-of-care platforms for biomarker detection in biological fluids. *Anal Bioanal Chem* 418, 459–481 (2026). <https://doi.org/10.1007/s00216-025-06127-0>
5. *Fernandez Solis LN, Silva Junior GJ, Bertotti M, Angnes L, Pereira SV, Fernández-Baldo MA, Regiart M.* Electrochemical microfluidic immunosensor with graphene-decorated gold nanoporous for T-2 mycotoxin detection. *Talanta* (2024). doi: 10.1016/j.talanta.2024.125971.
6. *Xu M, Nahar L, Ritchie KJ, Wang C, Cheng L, Wu Z, Sarker SD, Guo M.* Recent advances in nanomaterial-based optical biosensors and their biomedical and biopharmaceutical applications. *J Pharm Anal* (2026). doi: 10.1016/j.jpha.2025.101349.

7. Niaraki A, McNamara MC, Montazami R, Hashemi NN. Graphene Microelectrodes for Real-Time Impedance Spectroscopy of Neural Cells. ACS Appl Bio Mater (2022). doi: 10.1021/acsabm.1c00913.
8. Wang, W.; Xia, L.; Xiao, X.; Li, G. Recent Progress on Microfluidics Integrated with Fiber-Optic Sensors for On-Site Detection. Sensors (2024). <https://doi.org/10.3390/s24072067>
9. Masud, M.K., Natsuhara, D., Dai, Y. et al. A plasmonic mesoporous gold-based SERS-microfluidic platform for the detection of infectious disease. J Mater Chem C 12, 17977–17985 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4TC01638F>.