

ДВУХРЕЖИМНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БАКТЕРИЙ

К. А. Гончар^{1*}, Д. А. Назаровская¹, П. А. Домнин², О. Д. Гюппенен¹, А. А. Ерохина¹,
М. Ван¹, И. И. Циняйкин¹, С.А. Ермолаева², Л.А. Осминкина¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

*E-mail: k.a.gonchar@gmail.com

²Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи
123098, Российская Федерация, Москва, ул.Гамалеи, д. 18

В работе представлены экспериментальные исследования по обнаружению бактерий *L. Inpposua* – непатогенного штамма листерий. В тонкой пленке пористых нанонитей, покрытых серебряными и золотыми наночастицами, после адсорбции бактерий наблюдались сдвиги интерферометрических полос, связанные с изменением эффективной оптической толщины образцов, позволяющие обнаруживать *L. Inpposua* до концентраций $6,4 \cdot 10^6$ КОЕ/мл. Кроме того, модификация поверхности нанонитей наночастицами серебра и золота придавала им ГКР-активные свойства, что позволило регистрировать спектры комбинационного рассеяния адсорбированных бактерий до концентраций $3,2 \cdot 10^6$ КОЕ/мл. Таким образом, была продемонстрирована двухрежимная оптическая диагностика бактерий.

Оптические биосенсоры имеют значительные преимущества перед другими аналитическими методами благодаря хорошей чувствительности, удобству и простоте использования, воспроизводимости и надежности. Для преобразования сигнала в оптических датчиках можно использовать эффекты интерферометрии, поверхностного плазмонного резонанса, дифракционных решеток фотонных кристаллов, преобразователей на основе оптических волноводов, эллипсометрии и др. [1].

Наиболее распространенные оптические датчики основаны на эффектах интерференции света в тонких слоях кремниевых наноструктур, таких как пористый кремний различной морфологии [2] или кремниевые нанонити (КНН) [3]. Принцип работы такого датчика заключается в том, что освещение тонкого слоя кремниевых наноструктур белым светом приводит к отражению света от верхней и нижней границы наноструктур, создавая интерференцию Фабри-Перо, где частота интерференции определяется эффективной оптической толщиной слоя кремниевых наноструктур [2,4]. Изменение эффективного показателя преломления кремниевых наноструктур после адсорбции биологических молекул и клеток проявляется в смещении интерференционных полос и/или изменении их амплитуды [2–7].

Еще одним популярным методом обнаружения различных биомолекул является гигантское комбинационное рассеяние (ГКР) [8]. Представлен простой метод декорирования КНН наночастицами золота и серебра путем восстановления их из AgNO_3 и AuCl_3 в присутствии 5М HF с целью придания ГКР-активных свойств полученным композитным подложкам [9]. Кроме того, с помощью ГКР на КНН, декорированных золотом, был успешно обнаружен билирубин с пределом обнаружения 1 мкМ [10], а также интерналин В, белок, связанный с патогенными бактериями *Listeria monocytogenes*, был успешно обнаружен с помощью ГКР на КНН, декорированных серебром [11].

В этом исследовании были объединены два метода обнаружения: интерференция Фабри-Перо и ГКР, и было показано, что КНН, покрытые наночастицами золота и серебра, могут быть использованы для создания бимодального оптического сенсора для диагностики бактерий.

Были получены и исследованы КНН, покрытых золотыми и серебряными наночастицами, с толщиной КНН 2,3 мкм и толщиной биметаллического слоя 100 нм. Показана возможность диагностики *L. Inpposua* до концентраций $6,4 \cdot 10^6$ КОЕ/мл по изменению эффективной оптической толщины. Показана возможность диагностики *L. Inpposua* по спектрам ГКР после их адсорбции на КНН, покрытых золотыми и серебряными наночастицами, до концентраций $3,2 \cdot 10^6$ КОЕ/мл. В спектрах ГКР наблюдаются пики, ха-

рактерные для белков клеточной стенки грамположительных бактерий *Listeria*. Можно заключить, что данные образцы эффективны в качестве бимодального оптического сенсора для диагностики бактерий. Разработанный датчик демонстрирует потенциал для быстрой диагностики и идентификации бактерий без использования меток, что делает его универсальным инструментом для разнообразных применений в области обнаружения микробов. Схема работы двухрежимного сенсора приведена на рисунке 1.

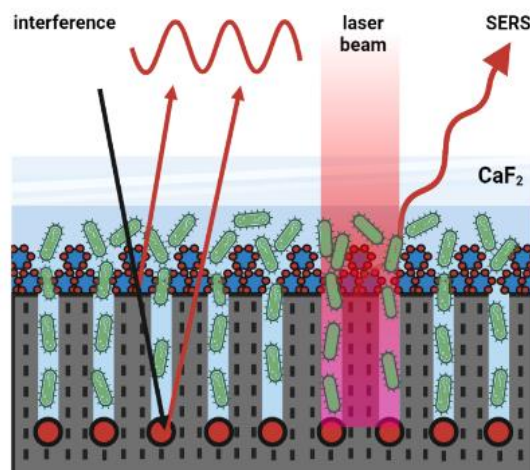


Рис.1. Схема работы двухрежимного сенсора на основе КНН, покрытых золотыми и серебряными наночастицами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10062, <https://rscf.ru/project/22-72-10062/>.

Список литературы

1. M. Nirschl, F. Reuter, J. Vörös, Review of Transducer Principles for Label-Free Biomolecular Interaction Analysis // *Biosensors*, vol. 1(3), pp. 70-92, 2011.
2. A. Jane, R. Dronov, A. Hodges, et.al. Porous silicon biosensors on the advance // *Trends in biotech.*, vol. 27(4), pp. 230-239, 2009.
3. K.A. Gonchar, S.N. Agafilushkina, D.V. Moiseev, et.al. H1N1 influenza virus interaction with a porous layer of silicon nanowires // *Mater. Res. Express*, vol. 7, p. 035002, 2020.
4. V.S. Lin, K. Motesharei, K.P. Dancil, et.al. A porous silicon-based optical interferometric biosensor // *Science*, vol. 278(5339), 840-843, 1997.
5. M.B. Gongalsky, A.A. Koval, S.N. Schevchenko, et.al. Double Etched Porous Silicon Films for Improved Optical Sensing of Bacteria // *J. Electr. Soc.*, 164(12), p. B581, 2017.
6. N. Massad-Ivanir, G. Shtenberg, E. Segal, Optical Detection of E. coli Bacteria by Mesoporous Silicon Biosensors // *J. Vis. Exp.*, vol. 81, p. 50805, 2013.
7. N. Massad-Ivanir, G. Shtenberg, N. Raz, et.al. Porous Silicon-Based Biosensors: Towards Real-Time Optical Detection of Target Bacteria in the Food Industry // *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 38099, 2016.
8. S. Pahlow, S. Meisel, D. Cialla-May, et.al. Isolation and identification of bacteria by means of Raman spectroscopy // *Adv. Drug Del. Rev.*, vol. 89, pp. 105-120, 2015.
9. O. Žukovskaja, S. Agafilushkina, V. Sivakov, et.al. Rapid detection of the bacterial biomarker pyocyanin in artificial sputum using a SERS-active silicon nanowire matrix covered by bimetallic noble metal nanoparticles // *Talanta*, vol. 202, pp. 171-177, 2019.
10. A.D. Kartashova, K.A. Gonchar, D.A. Chermoshentsev, et.al. Surface-Enhanced Raman Scattering-Active Gold-Decorated Silicon Nanowire Substrates for Label-Free Detection of Bilirubin // *ACS Biomater. Sci. Eng.*, vol. 8(10), pp. 4175-4184, 2022.
11. K.A. Gonchar, E.A. Alekseeva, O.D. Gyuppenen, et.al. Optical Express Monitoring of Internalin B Protein of *Listeria Monocytogenes* Pathogenic Bacteria Using SERS-Active Silver-Decorated Silicon Nanowires // *Opt. Spectrosc.*, vol. 130, pp. 521-526, 2022.