

09.1

Исследование чувствительности микродискового лазера к изменению показателя преломления окружающей среды

© Н.В. Крыжановская^{1,2}, И.А. Мельниченко¹, А.С. Букатин^{2,3}, А.А. Корнев², Н.А. Филатов², С.А. Щербак^{1,2}, А.А. Липовский², А.С. Драгунова^{1,2}, М.М. Кулагина⁴, А.И. Лихачев⁴, М.В. Фетисова^{2,5}, И.В. Редуто⁵, М.В. Максимов², А.Е. Жуков¹

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Institute of Photonics, University of Eastern Finland, Joensuu, Finland

E-mail: nataliakryzh@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 мая 2021 г.

В окончательной редакции 25 июня 2021 г.

Принято к публикации 25 июня 2021 г.

Исследована зависимость спектрального положения линии генерации микродискового лазера с квантовыми точками InAs/InGaAs/GaAs от показателя преломления водного раствора, в который погружен микролазер. Для микролазеров диаметром 10 μm , помещенных в водный раствор глюкозы, получена максимальная величина сдвига резонанса 9.4 nm/RIU.

Ключевые слова: микролазер, квантовые точки, моды шепчущей галереи, сенсор, детектирование.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51510.18878

В настоящее время существует необходимость поиска новых решений для создания миниатюрных оптических датчиков и сенсоров, способных работать в режиме реального времени [1,2]. Одним из направлений развития сенсорных элементов являются оптические микрорезонаторы с центральной или осевой симметрией (микросферы, микродиски, микрокольца), в которых осуществляется эффективная локализация электромагнитного поля в трех направлениях [3]. В таких резонаторах формируются высокодобротные моды шепчущей галереи (МШГ), возникающие за счет полного внутреннего отражения электромагнитных волн от стенок резонатора. Известно, что микрорезонаторы с МШГ обладают высокой чувствительностью к изменениям и возмущениям параметров окружающей среды вблизи их поверхности [4], что позволяет использовать их в качестве сенсоров, отслеживающих изменения окружающей среды. Один из механизмов детектирования с помощью МШГ-микрорезонатора основан на измерении сдвига длины волны резонанса, вызванного изменением показателя преломления окружающей среды. Сенсоры на основе МШГ-микролазеров имеют ряд преимуществ перед аналогами на основе пассивных МШГ-микрорезонаторов благодаря тому, что они сами являются источником излучения с большей интенсивностью и узкой спектральной линией и не требуют внешнего лазера [5]. Кроме того, пороговый характер лазерной генерации способен увеличить чувствительность к слабым изменениям окружающей среды. В настоящее время уже реализованы микродисковые лазеры на основе кван-

товых точек InAs/InGaAs/GaAs, способные работать в непрерывном режиме при оптической накачке в водной среде [6]. Кроме того, такие микролазеры могут быть успешно интегрированы с кремниевой подложкой [7], с детектором лазерного излучения [8], а также демонстрируют скорость передачи данных до 10 Gb/s при низком энергопотреблении [9].

Детектирование водных растворов биологического происхождения подразумевает возможность определения малых изменений показателя преломления. Несмотря на высокую привлекательность полупроводниковых МШГ-лазеров для использования в качестве детектирующих элементов, в настоящее время практически отсутствуют работы, в которых были бы выполнены оценки сдвига МШГ резонанса при изменении показателя преломления окружающей среды. В настоящей работе впервые проведена теоретическая оценка сдвига МШГ резонанса и выполнено экспериментальное исследование спектрального положения линии лазерной генерации InAs/InGaAs/GaAs-квантовых точек микролазера в зависимости от показателя преломления водной среды, в которую помещался микролазер.

Полупроводниковая гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на нелегированной подложке GaAs (100). После осаждения буферного слоя GaAs выращивался слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ толщиной 400 nm. Активная область помещалась в волноводный слой GaAs (220 nm) и представляла собой пять слоев квантовых точек InAs/ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, разделенных спейсерами GaAs толщиной 30 nm. Спектраль-

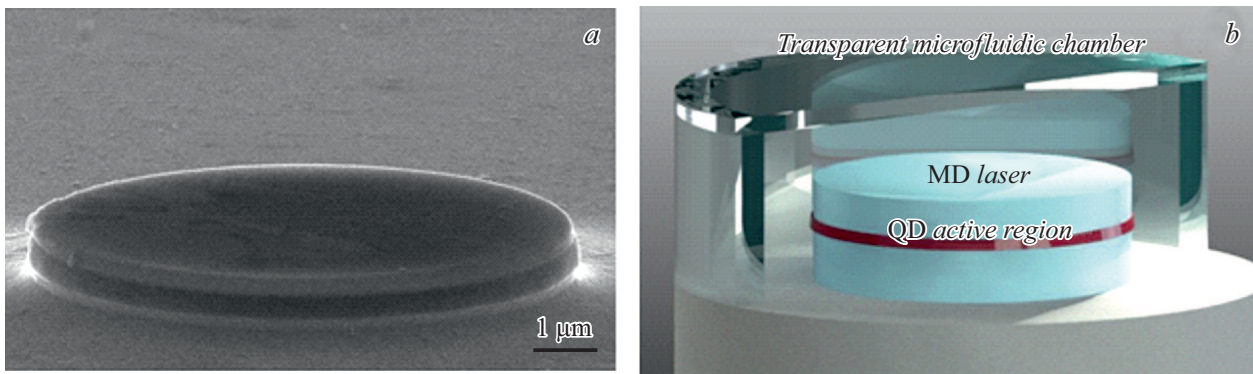


Рис. 1. Изображение микролазера, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 7001F (JEOL, Япония) (а), и схематическое изображение микролазера, размещенного в прозрачной камере (б).

ное положение основного перехода квантовых точек располагается вблизи $1.3 \mu\text{m}$ при комнатной температуре. Микродисковые резонаторы были сформированы методом фотолитографии и ионно-лучевого травления (Ag^+). Были исследованы резонаторы диаметром $7\text{--}10 \mu\text{m}$ (рис. 1, а). Слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ был преобразован в оксид $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ методом селективного окисления для реализации оптического ограничения со стороны подложки, препятствующего утеканию моды в подложку. После этого методом атомно-слоевого осаждения микродиски были покрыты слоем диоксида кремния толщиной 5 nm для защиты поверхности лазера при погружении в водные растворы. Далее образец с микролазерами помещался в прозрачную ячейку из полидиметилсилоксана, снабженную микроканалами, через которые ее можно было заполнять жидкостью (рис. 1, б). В качестве тестовых жидкостей были использованы водные растворы хлорида натрия (NaCl) и глюкозы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), для которых хорошо известны зависимости показателя преломления от концентрации.

Исследования спектров излучения микролазеров выполнялись при комнатной температуре при оптической накачке лазером $\text{YLF}:\text{Nd}$ (527 nm), работающим в непрерывном режиме, с использованием оптического конфокального микроскопа (Ntegra Spectra, NT-MDT). Для фокусировки лазерного пятна диаметром $\sim 1 \mu\text{m}$ на поверхность микродискового лазера использовался объектив $\times 100$ (Mitutoyo, $NA = 0.5$). Этот же объектив применялся для сбора излучения микролазера, которое детектировалось с помощью монохроматора MS5204i (SOL Instruments) и многоканального охлаждаемого InGaAs -детектора iDUS (Andor). Спектральное разрешение установки составило 16 pm . Спектры излучения микролазеров исследовались вблизи порога лазерной генерации для предотвращения перегрева образцов излучением лазера накачки. Полуширина линии излучения вблизи порога генерации, т.е. при близкой к нулю мощности излучения, составила около 60 pm , что позволяет выполнить оценку добротности резонатора ($Q \sim \lambda/\Delta\lambda$) и сделать вывод, что добротность не хуже чем $2 \cdot 10^4$.

С помощью численного моделирования был выполнен расчет спектрального положения резонанса микродискового лазера при изменении показателя преломления окружающей среды. Для анализа МШГ в микродисковых резонаторах использовалось численное моделирование методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Были рассмотрены МШГ первых трех радиальных порядков микродиска диаметром $8 \mu\text{m}$ на основе GaAs , длина волны которых лежит вблизи $1.3 \mu\text{m}$ (вставки к рис. 2, а). Результаты расчета показали заметный длинноволновый сдвиг длины волны МШГ резонанса при изменении показателя преломления окружающей среды в интервале $1.32\text{--}1.35$, причем полученная зависимость имеет линейный характер (рис. 2, а). Величина сдвига возрастает от 6 nm/RIU (refractive index unit) для моды с нулевым радиальным порядком до 9.7 nm/RIU для моды со вторым радиальным порядком. Более сильная чувствительность мод старших радиальных порядков к изменению показателя окружающей среды связана с тем, что они менее локализованы внутри резонатора, область спадающего поля за границу резонатора у них больше и соответственно влияние окружающей среды также сильнее [10]. Отметим, что в соответствии с расчетами рассматриваемое малое изменение показателя преломления окружения не оказывает влияния на добротность МШГ [11].

На основе деионизированной воды были приготовлены растворы соли (NaCl) с концентрацией $0\text{--}20\%$ и глюкозы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) с концентрацией $0\text{--}30\%$, что для длины волны $\sim 1.3 \mu\text{m}$ соответствует линейному изменению коэффициента преломления $n = 1.32\text{--}1.37$ (вставка к рис. 3, а) [12].

При увеличении концентрации соли ширина линии резонанса не меняется, что свидетельствует о неизменности добротности и уровня оптических потерь (рис. 2, б). Спектральное положение резонансной длины волны сдвигается в длинноволновую сторону линейно (рис. 3, а) в зависимости от концентрации NaCl в растворе. По наблюдаемой величине сдвига можно оценить чувствительность микролазера к изменению показателя

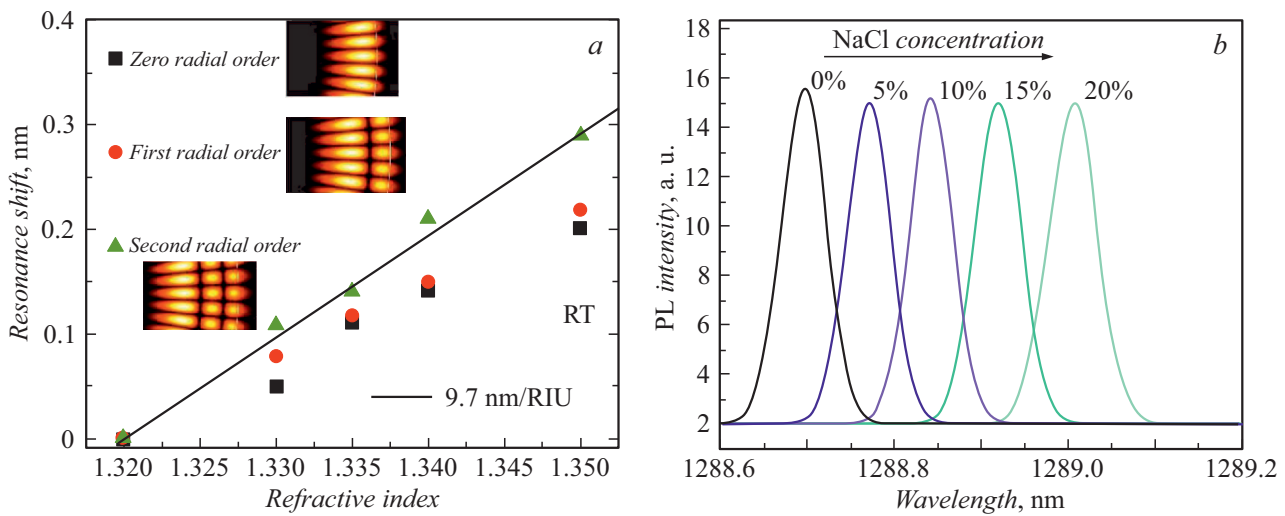


Рис. 2. *a* — результаты расчета спектрального положения МШГ резонансов микродискового лазера диаметром $8\ \mu\text{m}$ в зависимости от показателя преломления окружающей среды для случаев нулевого (квадраты), первого (кружки) и второго (треугольники) радиального порядка моды. Линия соответствует чувствительности $9.7\ \text{nm/RIU}$. На вставках — рассчитанные распределения электрического поля рассматриваемых МШГ в латеральной плоскости микролазера. *b* — спектры фотолюминесценции микролазера диаметром $10\ \mu\text{m}$, полученные при различной концентрации водного раствора соли (*b*).

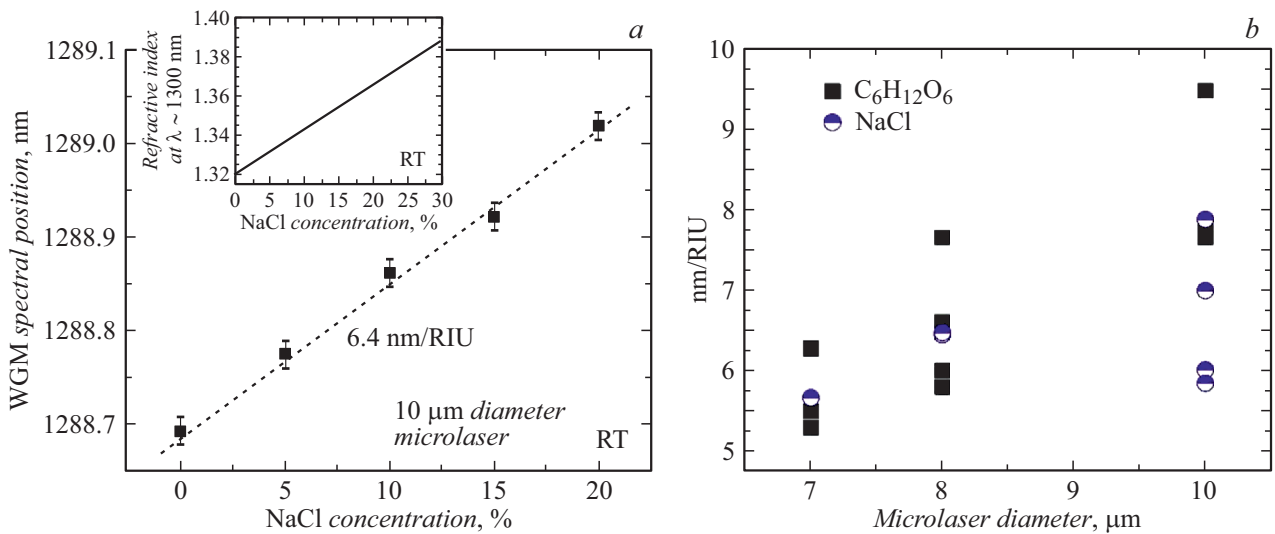


Рис. 3. *a* — зависимость спектрального положения резонанса микролазера диаметром $10\ \mu\text{m}$ от концентрации водного раствора соли (на вставке — зависимость показателя преломления от концентрации водного раствора соли); *b* — значения чувствительности микролазеров диаметром $7\text{--}10\ \mu\text{m}$ к изменению показателя преломления раствора для водных растворов соли (кружки) и глюкозы (квадраты).

преломления как $6.4\ \text{nm/RIU}$, что хорошо согласуется с данными численного расчета для моды нулевого радиального порядка.

Также были выполнены измерения чувствительности для различных мод микролазеров, в том числе для не участвующих в лазерной генерации (боковых) мод, интенсивность которых на несколько порядков меньше, чем у лазерной моды. Полученные значения для микролазеров диаметром $7\text{--}10\ \mu\text{m}$, погруженных в приготовленные растворы соли и глюкозы, представлены на рис. 3, *b*. Наблюдается разброс значений чувстви-

тельности от 5.5 до $9.4\ \text{nm/RIU}$, связанный с наличием в спектре мод различного радиального порядка.

Таким образом, в результате исследования показана возможность использования микролазеров дисковой геометрии с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs в качестве универсальных биохимических сенсоров, способных работать в жидких средах. Получено максимальное значение чувствительности длины волны микролазера к изменению показателя преломления $9.4\ \text{nm/RIU}$. Учитывая, что полуширина линии излучения составляет около $60\ \text{pm}$, мы можем заключить,

что возможно детектирование минимального изменения показателя преломления на величину 0.006. Полученное значение спектрального сдвига позволяет судить о возможности создания биосенсоров, пригодных для детектирования таких веществ, как бычий сывороточный альбумин (BSA) или человеческий IgG (Human IgG), в концентрациях порядка pg/ml [13].

Благодарности

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00334), расчеты проведены в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ. А.С. Букатин, Н.А. Филатов и А.А. Корнев благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (проект № 0791-2020-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Lin, K.B. Crozier, ACS Nano, **7**(2), 1725 (2013). DOI: 10.1021/nn305826j
- [2] S.M. Borisov, O.S. Wolfbeis, Chem. Rev., **108**(2), 423 (2008). DOI: 10.1021/cr068105t
- [3] J. Su, Sensors, **17**(3), 540 (2017). DOI: 10.3390/s17030540
- [4] L. He, Ş.K. Özdemir, L. Yang, Laser Photon. Rev., **7**(1), 60 (2013). DOI: 10.1002/lpor.201100032
- [5] Y.C. Chen, X. Tan, Q. Sun, Q. Chen, W. Wang, X. Fan, Nature Biomed. Eng., **1**(9), 724 (2017). DOI: 10.1038/s41551-017-0128-3
- [6] M.V. Fetisova, N.V. Kryzhanovskaya, I.V. Reduto, E.I. Moiseev, S.A. Blokhin, K.P. Kotlyar, S.A. Scherbak, A.A. Lipovskii, A.A. Kornev, A.S. Bukatin, M.V. Maximov, A.E. Zhukov, J. Phys.: Conf. Ser., **1124**(5), 051007 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1124/5/051007
- [7] А.Е. Жуков, Э.И. Моисеев, А.М. Надточий, А.С. Драгунова, Н.В. Кръжановская, М.М. Кулагина, А.М. Можаров, С.А. Кадинская, О.И. Симчук, Ф.И. Зубов, М.В. Максимов, Письма в ЖТФ, **46**(16), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.16.49844.18354
- [8] Н.В. Кръжановская, А.М. Надточий, Э.И. Моисеев, А.Е. Жуков, А.А. Харченко, С.А. Минтаиров, Н.А. Калужный, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, Письма в ЖТФ, **46**(13), 7 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49582.18301
- [9] N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, F.I. Zubov, A.M. Mozharov, M.V. Maximov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, Yu.A. Guseva, M.M. Kulagina, S.A. Blokhin, Yu. Berdnikov, A.E. Zhukov, J. Appl. Phys., **126**(6), 063107 (2019). DOI: 10.1063/1.5108556
- [10] I. Reduto, M. Fetisova, N. Kryzhanovskaya, K. Kotlyar, A. Raskhodchikov, S. Scherbak, Yu. Guseva, A. Lipovskii, M. Maximov, A. Zhukov, J. Opt. Soc. Am. B, **36**(8), 2285 (2019). DOI: 10.1364/JOSAB.36.002285
- [11] A.V. Raskhodchikov, S.A. Scherbak, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, A.A. Lipovskii, J. Phys.: Conf. Ser., **1124**(5), 051031 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1124/5/051031
- [12] <https://refractiveindex.info/>
- [13] Z. Guo, Y. Qin, P. Chen, J. Hu, Y. Zhou, X. Zhao, Small, **16**(26), 2000239 (2020). DOI: 10.1002/sml.202000239