15

Изучение распространения света в режиме мод шепчущей галереи в цилиндрическом микрорезонаторе с частично удаленной кварцевой оболочкой методом травления плавиковой кислотой

© Н.А. Макарова[1], В.С. Терентьев[2], И.Д. Ватник[1]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
[2] Институт автоматики и электрометрии,
630090 Новосибирск, Россия

e-mail: n.makarova@g.nsu.ru

Поступила в редакцию 15.12.2023 г.
В окончательной редакции 21.12.2023 г.
Принята к публикации 29.01.2023 г.

Изучены основные параметры цилиндрических микрорезонаторов на основе оптоволокна с частично удаленной кварцевой оболочкой методом травления с помощью плавиковой кислоты — добротность, вариация эффективного радиуса. Показана возможность возбуждения мод шепчущей галереи в образцах, кварцевая оболочка которых модифицирована методом травления. Установлено, что с увеличением удаленной кварцевой оболочки методом травления с помощью плавиковой кислоты добротность микрорезонатора падает вследствие того, что растет неоднородность поверхности.

Ключевые слова: цилиндрический микрорезонатор, моды шепчущей галереи, добротность, вариация эффективного радиуса, кварцевая оболочка.

DOI: 10.61011/OS.2024.02.57777.5821-23

Введение

Одним из главных элементов большого числа оптических устройств является резонатор. Микрорезонаторы мод шепчущей галереи (МШГ) обладают многими преимуществами (чрезвычайная чувствительность к изменениям показателя преломления окружающей среды [1], малый эффективный объем поля, высокая добротность [2]), что позволяет их использовать в качестве оптических линий задержки [3], биосенсоров [4], устройств для исследования нелинейных эффектов [5], а в будущем как элемент квантового суперкомпьютера [6].

Одним из перспективных типов микрорезонаторов является цилиндрический микрорезонатор на основе кварцевых оптических волокон. Качество поверхности кварцевой оболочки (КО) даже обычного телекоммуникационного волокна достаточно высокое, чтобы поддерживать моды шепчущей галереи с добротностью не менее 10^6 [7]. Кроме того, вариацией эффективного радиуса можно прецизионным способом управлять структурой мод [8]. Например, для параболической формы вариации эффективного радиуса будет наблюдаться эквидистантный спектр мод с разным числом максимумов вдоль оси цилиндра [9].

В цилиндрическом микрорезонаторе на основе оптоволокна свет в режиме МШГ распространяется внутри кварцевой оболочки вблизи ее поверхности, но не достигает сердцевины оптоволокна. При удалении КО свет в режиме МШГ потенциально сможет распространяться и по материалу сердцевины оптоволокна. Если радиус сердцевины будет $> 10\,\mu$m, то радиационные потери будут достаточно малы [10]. Тогда, если сердцевина будет легирована редкоземельным элементом, потенциально можно получить лазерную генерацию в таком микрорезонаторе. Вдобавок к этому непосредственно при изготовлении легированного редкоземельными элементами кварцевого цилиндра методом осаждения из газовой фазы легирование может отсутствовать на глубинах вплоть до несколько единиц микрон из-за диффузии активных примесей, т. е. для возбуждения МШГ в активной среде потребуется удалить часть поверхности. Кроме того, при существенном изменении эффективного радиуса можно значительно изменять дисперсию цилиндрического микрорезонатора, что необходимо для достижения параметрической генерации и генерации оптических частотных гребенок в таких системах [11].

Для изменения дисперсии и создания лазерной генерации в микрорезонаторе возникает задача удаления КО оптического волокна. Одним из известных методов по удалению КО оптоволокна является метод травления с помощью плавиковой кислоты [12]. Необходимо отметить, что поскольку свет в режиме МШГ циркулирует вблизи поверхности, свойства модифицированной поверхности оказывают заметное влияние на свойства мод, в частности, на их добротность. Поэтому важным при удалении КО является сохранение гладкости и однородности поверхности микрорезонатора. Образовавшиеся неоднородности на поверхности микрорезонатора с частично удаленной КО могут заметно уменьшить добротность микрорезонатора.

Настоящая работа посвящена изучению параметров микрорезонаторов (добротность и вариация эффективного радиуса), модифицированных методом травления с помощью плавиковой кислоты.

Теория

В оптическом резонаторе МШГ возникают, когда свет за счет полного внутреннего отражения, проделав оборот вдоль внутренней поверхности, возвращается к началу своего оптического пути. За счет многократного отражения от поверхности резонатора и конструктивной интерференции возбуждаются только определенные длины волн, удовлетворяющие уравнению

$$2\pi Rn = m\lambda, \tag{1}$$

где m — целое число, представляющее собой номер азимутальной моды, т.е. количество длин волн, укладывающихся в периметр; λ — резонансная длина волны; R — радиус микрорезонатора; n — показатель преломления среды. Далее вместо произведения Rn будем писать эффективный радиус — r_{ef}. Сделаем некую вариацию Δr_{ef} эффективного радиуса в микрорезонаторе, тогда резонансная длина волны, исходя из уравнения (1), сместится на величину $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda/\lambda = \Delta r_{\text{ef}}/r_{\text{ef}}, \tag{2}$$

Таким образом, измерение сдвига длины волны резонанса $\Delta\lambda(z)$ вдоль оси цилиндрического микрорезонатора z позволяет определить вариацию $\Delta r_{\text{ef}}(z)$ эффективного радиуса в данной точке.

Другим важным параметром, определяющим качество микрорезонатора, является добротность. Значение добротности определяется различными видами потерь. Появление неоднородностей на поверхности приводит к появлению дополнительных радиационных потерь при распространении света в режиме МШГ. Для сферического микрорезонатора в работе [13] было показано, что добротность из-за поверхностных неоднородностей определяется как

$$Q \sim \frac{a}{B^2\sigma^2}, \tag{3}$$

где a — радиус сферического микрорезонатора, B определяет характерный размер неоднородностей и называется длиной корреляции, $\sigma^2 = \langle f(x,z)^2\rangle$ — среднеквадратичная шероховатость поверхности.

Из формулы (3) видно, что добротность сильно зависит от размеров неоднородностей на поверхности волокна. Так, для $B = 10\,\text{nm}$ и $\sigma = 1\,\text{nm}$ при излучении с длиной волны $1.5\,\mu\text{m}$ в оптическом волокне радиусом $50\,\mu\text{m}$ добротность составит около $10^5 - 10^6$, а при увеличении σ в 10 раз, добротность упадет в 100 раз, т.е. составит $10^3 - 10^4$. Таким образом, любое появление неоднородностей может существенно ухудшить добротность.

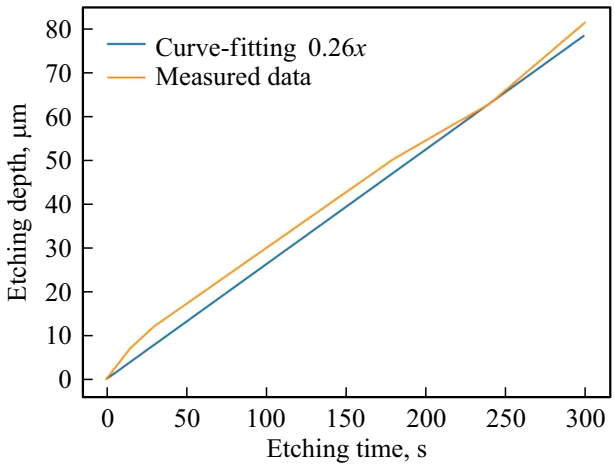

Рис. 1. Скоростьтравления КО кислотой HF с концентрацией 12.5%.

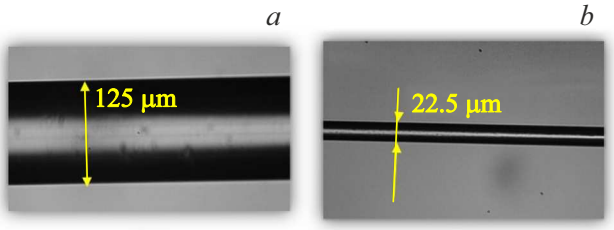

Рис. 2. Образец с КО, частично удаленной методом травления с помощью HF: (*a*) до травления, (*b*) после травления.

Измерение скорости травления

В процессе травления оптоволокно с предварительно удаленной защитной акрилатной оболочкой погружалось в сосуд с плавиковой кислотой концентрацией 12.5% на определенное время при комнатной температуре. Под воздействием HF была частично удалена КО с поверхности оптического волокна. Далее травленое волокно промывалось дистиллированной водой, чтобы удалить остатки кислоты на поверхности, и отжигалось нагревом сфокусированного излучения CO_2-лазера для удаления воды с поверхности образца. Этот процесс повторялся несколько раз для того, чтобы понять зависимость глубины травления КО (разности между начальным диаметром оптоволокна ($125\,\mu\text{m}$) и диаметром волокна после травления) от времени травления (рис. 1). Скорость травления составила 4.3 nm/s, что в 11 раз больше, чем скорость травления такого же волокна в 12%-кислоте HF, полученная в [14]. Различие в скорости можно объяснить тем, что времена, на которых происходило травление в работе [14], лежали в пределах от 5 до 25 s, в то время как в нашей работе — от 15 до 300 min.

Для изучения качества поверхности после травления были изучены снимки образцов под микроскопом (рис. 2). Поверхность после травления визуально кажется гладкой и однородной, что позволяет предположить

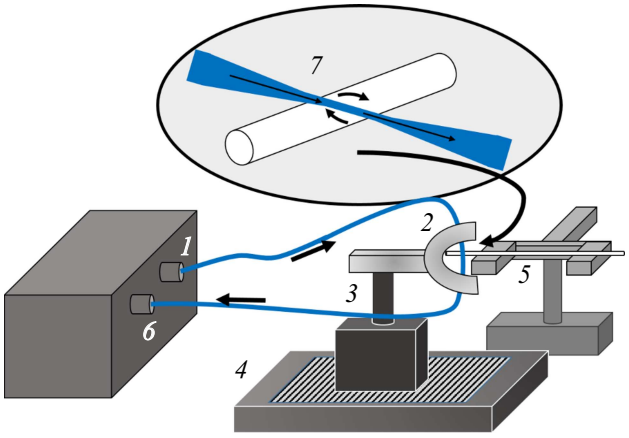

Рис. 3. Установка для измерения спектров пропускания микрорезонатора: *1* — источник излучения, *2* — биконическое волокно, *3* — держатель микроволокна, *4* — подвижка, *5* — образец, *6* — детектор, *7* — область контакта биконического волокна и образца.

возможность возбуждения МШГ, спектры которых будут изучены далее.

Схема установки для измерения параметров микрорезонаторов

Для изучения параметров микрорезонаторов использовалась установка, изображенная на рис. 3. К источнику излучения 1 подключено одним концом биконическое волокно 2 (синее волокно на рис. 3). Данное волокно установлено на платформе 3, которая может перемещаться с помощью подвижек 4 вдоль образца 5. Спектр регистрируется на детекторе 6. Возбуждение МШГ в исследуемом образце осуществляется путём подведения биконического волокна в непосредственный контакт с образцом. Биконическое волокно в этом случае располагается перпендикулярно оси образца, касаясь его своей перетяжкой 7. За счёт равномерно сужающейся биконической формы волокна излучение, проходящее по нему, испытывает эффект нарушенного полного внутреннего отражения и частично утекает в исследуемый образец, возбуждая МШГ на резонансных длинах волн.

Затем излучение, совершив некоторое количество проходов в резонаторе и испытав потери, возвращается в биконическое волокно через зону контакта. В спектрах пропускания такой системы наблюдаются минимумы интенсивности на резонансных длинах волн, расположенных на спектральном расстоянии $\Delta\lambda$ друг от друга, соответствующих уравнению (1) для разных m [15]. По сдвигу минимума в спектре можно рассчитать вариацию эффективного радиуса. В процессе сканирования биконическое волокно перемещается вдоль образца, возбуждая при этом МШГ в разных точках резонатора [16]. Таким образом, строится спектрограмма — зависимость спектра пропускания и длины волны резонанса с заданным азимутальным, радиальным и поляризационным числом от координаты образца, т. е. снимается вид профиля модификации образца.

Спектры МШГ

Вначале были исследованы свойства микрорезонаторов на немодифицированном волокне (типа SMF-28). Типичный пример спектрограммы представлен на рис. 4. Как видно, резонансы сдвигаются в спектре при перемещении возбуждающего биконического волокна вдоль оси образца, т. е. существует ненулевая вариация радиуса (по правой шкале рис. 4), возникающая при производстве волокна [17]. По измерению ширины на полувысоте резонанса МШГ определяется добротность в данной точке микрорезонатора. Добротность микрорезонатора на основе стандартного волокна SMF-28, не подверженного травлению, составляет $10^6 - 10^7$ (в зависимости от точки измерения резонанса).

В процессе травления структура поверхности микрорезонатора меняется, что приводит к изменению распространения света в режиме МШГ в модифицированном волокне. При малых глубинах травления наблюдается незаметное изменение добротности микрорезонатора. При глубине травления $14\,\mu$m добротность микрорезонатора составила $(1.3 - 3.1) \cdot 10^6$ (в зависимости от точки измерения резонанса), при этом до травления добротность составляла $(1.3 - 5) \cdot 10^6$. При этом общая картина локализации мод вдоль оси микрорезонатора отличается от спектрограммы пропускания немодифицированного волокна. Появляется разброс вариаций эффективного радиуса (ВЭР) на участках около 0.5 mm вдоль оси микрорезонатора (показано стрелками на рис. 5). В образцах с малой глубиной травления (до $14\,\mu$m) разброс вариации эффективного радиуса $\delta\Delta r_{\text{ef}}$ составил единицы нанометров.

С увеличением глубины травления добротность падает. Так, в образце с глубиной травления $62\,\mu$m добротность составляет $(2.1 - 3) \cdot 10^5$, что на порядок меньше, чем в образце с глубиной травления $14\,\mu$m. Вдобавок к этому на длине около 0.4 mm вдоль оси микрорезонатора увеличился разброс ВЭР на несколько нанометров (рис. 6). В образцах с ещё большими глубинами травления добротность также продолжает падать (рис. 7, *a*). Добротность в образце с глубиной травления $102.5\,\mu$m составила $(1 - 1.2) \cdot 10^4$, т. е. упала почти на два порядка по сравнению с добротностью в микрорезонаторе с глубиной травления $14\,\mu$m.

С увеличением времени травления помимо ухудшения добротности в образце происходит увеличение разброса ВЭР, который наблюдается на масштабах в доли миллиметров. Эти масштабы много больше характерных размеров обратной величины аксиальной компоненты волнового вектора, направленной вдоль оси волокна ($\frac{1}{k_z} \sim 50\,\mu$m [18]), т. е. никак не влияют на добротность мод микрорезонатора. Тем не

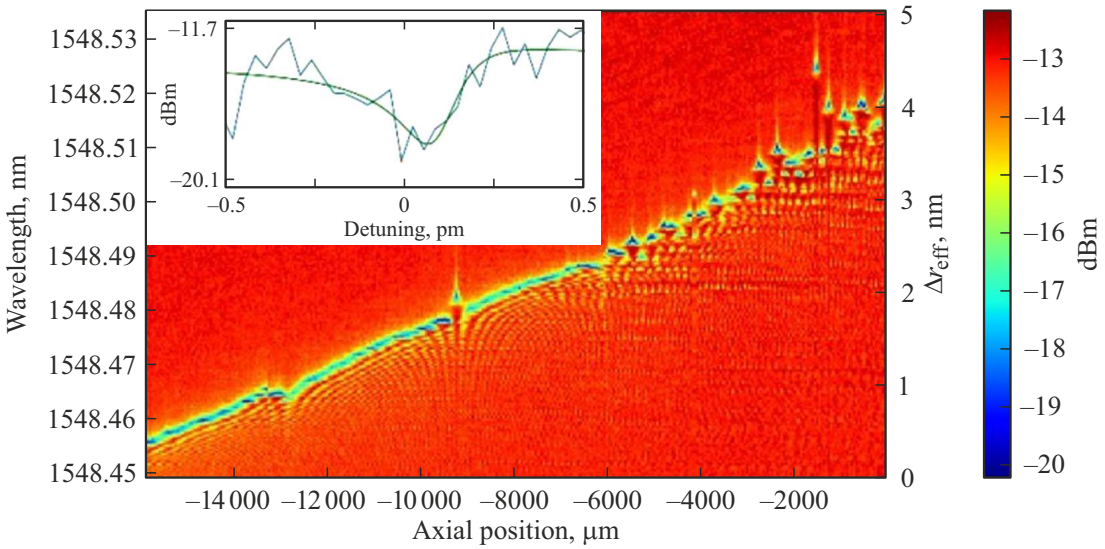

Рис. 4. Спектрограмма пропускания немодифицированного волокна. Радиус КО — 62.5 μm. Вставка — спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 0.25 pm с добротностью $6.2 \cdot 10^6$.

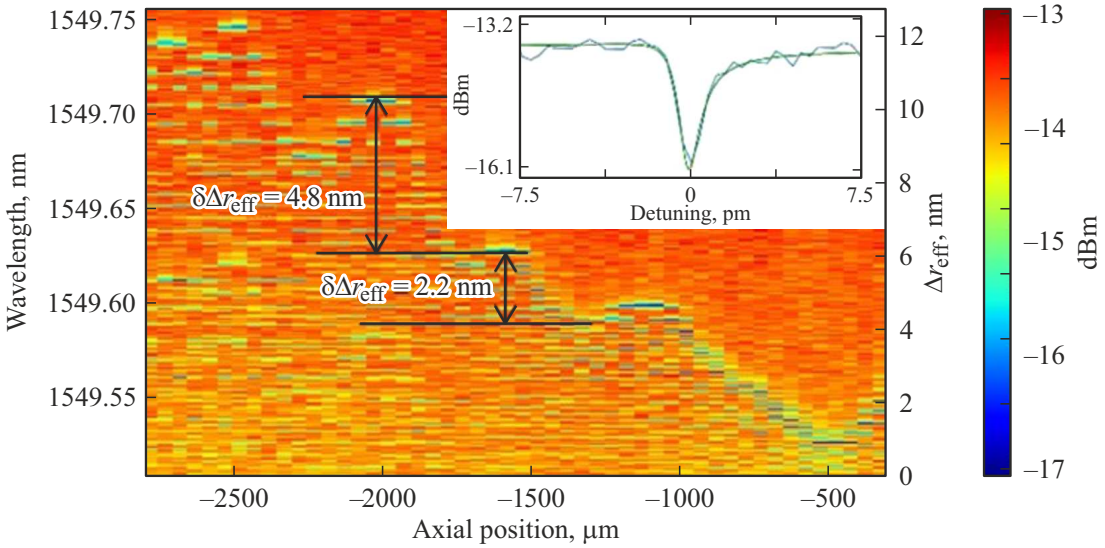

Рис. 5. Спектрограмма образца с глубиной травления 14 μm. Вставка — спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 1.32 pm с добротностью $1.2 \cdot 10^6$.

менее можно предположить, что рост разброса ВЭР на этих масштабах коррелирует с ростом среднеквадратичной шероховатости поверхности на малых масштабах.

Предположение о том, что разброс ВЭР на больших масштабах и шероховатость на малых масштабах растут одинаковым образом, позволяет описать падение добротности в эксперименте. Действительно, в микрорезонаторе с глубиной травления до 14 μm разброс ВЭР составляет 1 – 12 nm на длине 0.5 mm. Исходя из формулы (3), при увеличении среднеквадратичной шероховатости поверхности в 3.3 раза добротность микрорезонатора упадет на порядок. Такая зависимость наблюдается в эксперименте: при увеличении глубины травления до 80 μm разброс ВЭР увеличивается до 20 nm, при этом добротность уменьшается примерно на порядок. Наконец, в образце с глубиной травления 102.5 μm разброс ВЭР составил 50 – 90 μm, а добротность упала на два порядка по отношению к добротности микрорезонатора с глубиной травления до 14 μm (рис. 7). Из рассуждений следует, что с увеличением времени воздействия кислоты увеличивается шероховатость поверхности микрорезонатора. Эффект увеличения шероховатости ранее был описан как для травления поверхности кварцевого стекла парами HF [19], так и для травления жидкой фазой [20–22].

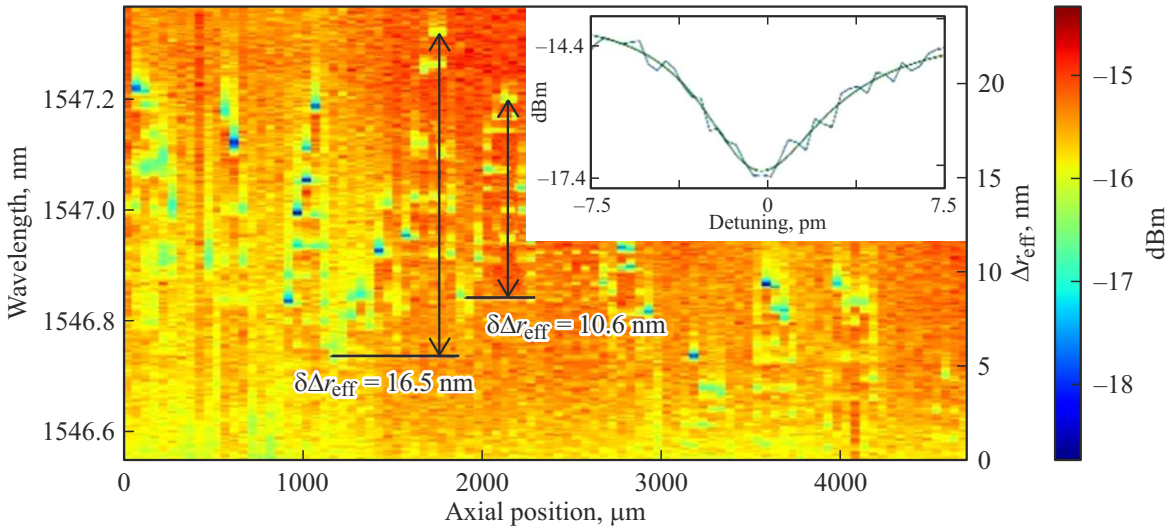

Рис. 6. Спектрограмма образца с глубиной травления 62.5 μm. Вставка - спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 7.19 pm с добротностью $2.2 \cdot 10^5$.

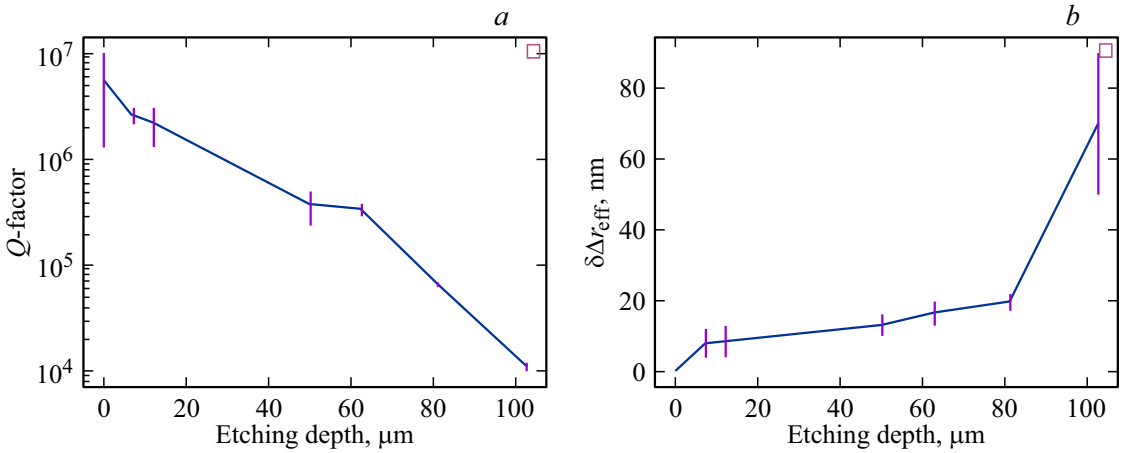

Рис. 7. (*a*) Зависимость добротности резонансов микрорезонатора от глубины травления (вертикальные отрезки показывают диапазон значений добротности в зависимости от точки микрорезонатора). (*b*) Зависимость среднего разброса ВЭР микрорезонатора от глубины травления (вертикальные отрезки указывают диапазон разброса ВЭР в зависимости от точки микрорезонатора)

Заключение

Показано, что МШГ возбуждаются в образцах с частично удалённой КО методом травления с помощью HF. В образцах с малой глубиной травления (до 14 μm) возбуждаются МШГ с добротностью не менее 10^6, что имеет тот же порядок, как и добротность в образце с цельной КО. С увеличением глубины травления добротность микрорезонатора падала вследствие роста шероховатости на поверхности образца. К примеру, в образцах с глубиной травления 50–65 μm добротность составляла 10^5, что на порядок меньше, чем в цилиндрическом микрорезонаторе с цельной КО. В образце с наибольшей полученной глубиной травления 102.5 μm также было исследовано распространение света в режиме МШГ. Добротность образца составила $(1 - 1.2) \cdot 10^4$, что на два порядка меньше, чем в цилиндрическом микрорезонаторе с цельной КО.

С ростом глубины травления увеличивался разброс ВЭР. В образцах с малой глубиной травления (до 14 μm) разброс ВЭР составлял единицы нанометров, а в образцах с большой глубиной травления данная величина увеличилась до десятков нанометров.

Благодарности

Работа В.С. Тереньтева выполнена в рамках госзадания Института автоматики и электрометрии СО РАН „Разработка элементов и исследование характеристик лазерных и сенсорных систем на основе структурированных волоконных световодов, микрорезонаторов и гибридных схем“ (FWNG-2024-0015). Работа Н.А. Мака-

ровой и И.Д. Ватника поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (FSUS-2020-0034).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Y. Zheng, Z. Wu, P. Ping Shum, Z. Xu, G. Keiser, G. Humbert, H. Zhang, S. Zeng, X. Quyen Dinh. Opto-Electronic Advances, **1** (9), 18001501-18001510 (2018). DOI: 10.29026/oea.2018.180015
[2] M. Pöllinger, A. Rauschenbeutel. Opt. Express, **18** (17), 17764–17775 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.017764
[3] M. Sumetsky. Phys. Rev. Lett., **111** (16), 163901 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.163901
[4] Y. Zhang, T. Zhou, B. Han, A. Zhang, Y. Zhao. Nanoscale, **10** (29), 13832–13856 (2018). DOI: 10.1039/C8NR03709D
[5] D. O'Shea, C. Junge, M. Pöllinger, A. Vogler, A. Rauschenbeutel. Appl. Phys. B, **105** (1), 129 (2011). DOI: 10.1007/s00340-011-4714-x
[6] Y.-F. Xiao, Z.-F. Han, G.-C. Guo. Phys. Rev. A, **73** (5), 052324 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevA.73.052324
[7] V. Vassiliev, M. Sumetsky. Light Sci. Appl., **12** (1), 197 (2023). DOI: 10.1038/s41377-023-01247-7
[8] M. Sumetsky, Y. Dulashko. Opt. Express, **20** (25), 27896–27901 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.027896
[9] M. Crespo-Ballesteros, A.B. Matsko, M. Sumetsky. Commun. Phys., **6** (1), 52(2023). DOI: 10.1038/s42005-023-01168-2
[10] V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko. Phys. Lett. A, **137** (7–8), 393–397 (1989). DOI: 10.1016/0375-9601(89)90912-2
[11] V. Dvoyrin, M. Sumetsky. Opt. Lett., **41** (23), 5547–5550 (2016). DOI: 10.1364/OL.41.005547
[12] J.-P. Laine, B.E. Little, H.A. Haus. IEEE Photon. Technol. Lett., **11** (11), 1429–1430 (1999). DOI: 10.1109/68.803068
[13] М.Л. Городецкий. *Основы теории оптических микрорезонаторов* (Физматлит, М., 2010), p. 164–166.
[14] N. Toropov, S. Zaki, T. Vartanyan, M. Sumetsky. Opt. Lett., **46** (7), 1784 (2021). DOI: 10.1364/OL.421104
[15] A. Yariv. Electron. Lett., **36** (4), 321 (2000). DOI: 10.1049/el:20000340
[16] T.A. Birks, J.C. Knight, T.E. Dimmick. IEEE Photon. Technol. Lett., **12** (2), 182–183 (2000). DOI: 10.1109/68.823510
[17] M. Sumetsky, Y. Dulashko. Opt. Lett., **35** (23), 4006 (2010). DOI: 10.1364/OL.35.004006
[18] M. Sumetsky. Opt. Express, **20** (20), 22537 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.022537
[19] L. Wang, L. Li, Y. Liu, S. Wang, H. Cai, H. Jin, Q. Tang, W. Sun, D. Yang. R. Soc. Open Sci., **7** (7), 192029 (2020). DOI: 10.1098/rsos.192029
[20] J.K. Vondeling. J. Mater. Sci., **18** (1), 304–314 (1983). DOI: 10.1007/BF00543840
[21] C. Mazzitelli, M. Ferrari, M. Toledano, E. Osorio, F. Monticelli, R. Osorio. J. Dent. Res., **87** (2), 186–190 (2008). DOI: 10.1177/154405910808700204
[22] G.A.C.M. Spierings. J. Mater. Sci., **28** (23), 6261–6273 (1993). DOI: 10.1007/BF01352182