

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

© Н.А. Макарова¹, В.С. Терентьев², И.Д. Ватник¹

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 29.01.2024 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 сердцевин оптоволокна. При удалении КО свет в режиме МШГ потенциально сможет распространяться и по материалу сердцевин оптоволокна. Если радиус

сердцевин будет $> 10 \mu\text{m}$, 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

$$2\pi Rn = m\lambda, \quad (1)$$

где m — целое число, представляющее собой номер азимутальной моды, т.е. количество длин волн, укладываемых 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 $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda/\lambda = \Delta r_{\text{ef}}/r_{\text{ef}}, \quad (2)$$

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

$$Q \sim \frac{a}{B^2\sigma^2}, \quad (3)$$

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.

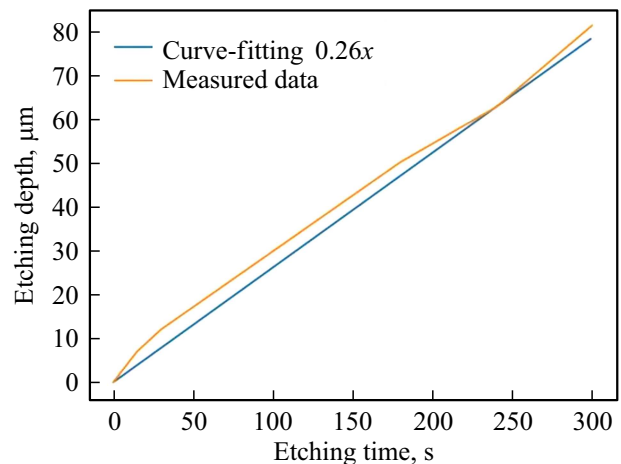


Рис. 1. Скорость травления КО кислотой HF с концентрацией 12.5%.

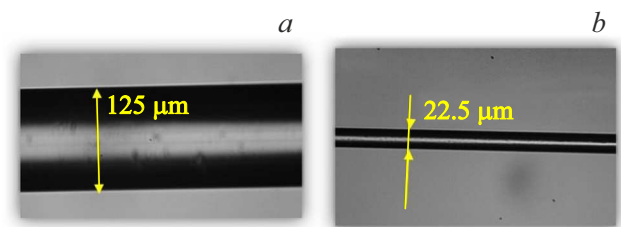


Рис. 2. Образец с КО, частично удаленной методом травления с помощью HF: (a) до травления, (b) после травления.

Измерение скорости травления

В процессе травления оптоволокно с предварительно удаленной защитной акрилатной оболочкой погружалось в сосуд с плавиковой кислотой концентрации 12.5% на определенное время при комнатной температуре. Под воздействием HF была частично удалена КО с поверхности оптического волокна. Далее травленное 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]. Различия в скорости можно объяснить тем, что времена, на которых происходило травление в работе [14], лежали в пределах от 5 до 25 с, 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

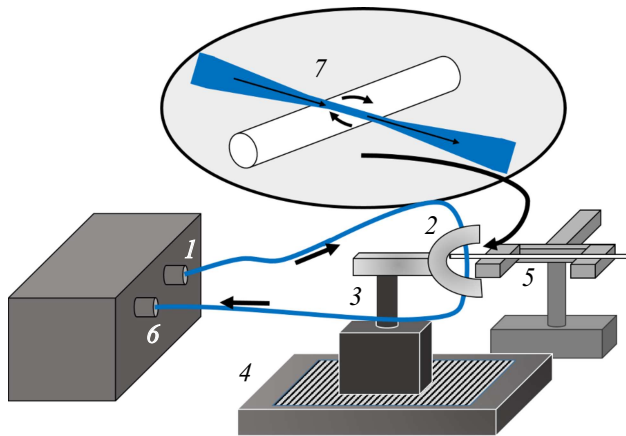


Рис. 3. Установка для измерения спектров пропускания микрорезонатора: 1 — источник излучения, 2 — биконическое волокно, 3 — держатель микроволокна, 4 — подвижка, 5 — образец, 6 — детектор, 7 — область контакта биконического волокна и образца.

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 $14\ \mu\text{m}$ 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 $0.5\ \text{mm}$ вдоль оси микрорезонатора (показано стрелками на рис. 5). В образцах с малой глубиной травления (до $14\ \mu\text{m}$) разброс вариации эффективного радиуса $\delta\Delta r_{\text{ef}}$ составил единицы нанометров.

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

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 ($\frac{1}{k_z} \sim 50\ \mu\text{m}$ [18]), т.е. никак не влияют на добротность мод микрорезонатора. Тем не

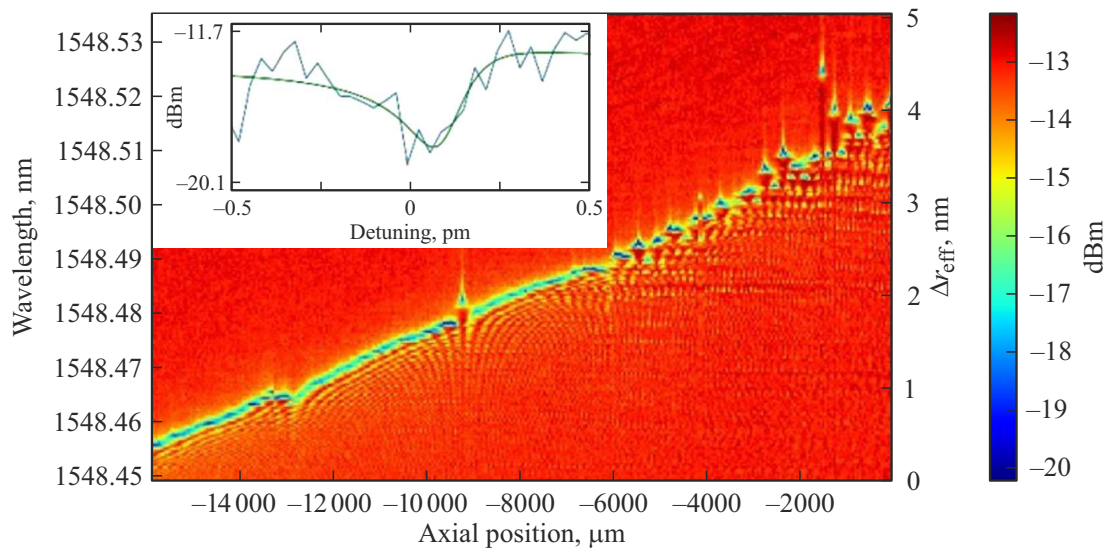


Рис. 4. Спектрограмма пропускания немодифицированного волокна. Радиус КО — $62.5 \mu\text{m}$. Вставка — спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 0.25 pm с добротностью $6.2 \cdot 10^6$.

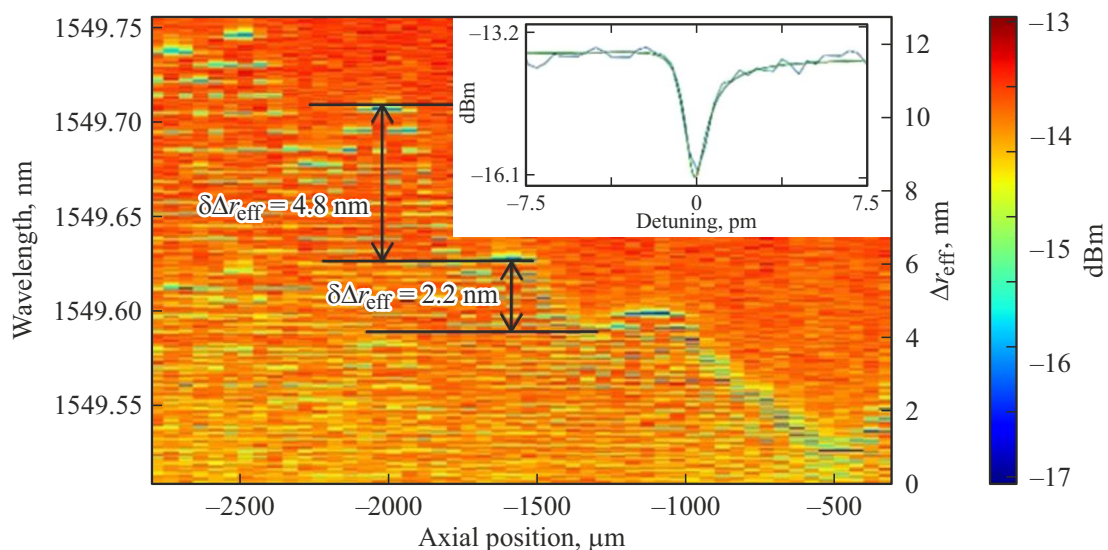


Рис. 5. Спектрограмма образца с глубиной травления $14 \mu\text{m}$. Вставка — спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 1.32 pm с добротностью $1.2 \cdot 10^6$.

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 $14 \mu\text{m}$ разброс ВЭР составляет $1 - 12 \text{ nm}$ 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 $80 \mu\text{m}$ разброс ВЭР увеличивается до 20 nm , при этом добротность уменьшается примерно на порядок. Наконец, в образце с глубиной травления $102.5 \mu\text{m}$ разброс ВЭР составил $50 - 90 \mu\text{m}$, а добротность упала на два порядка по отношению к добротности микрорезонатора с глубиной травления до $14 \mu\text{m}$ (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].

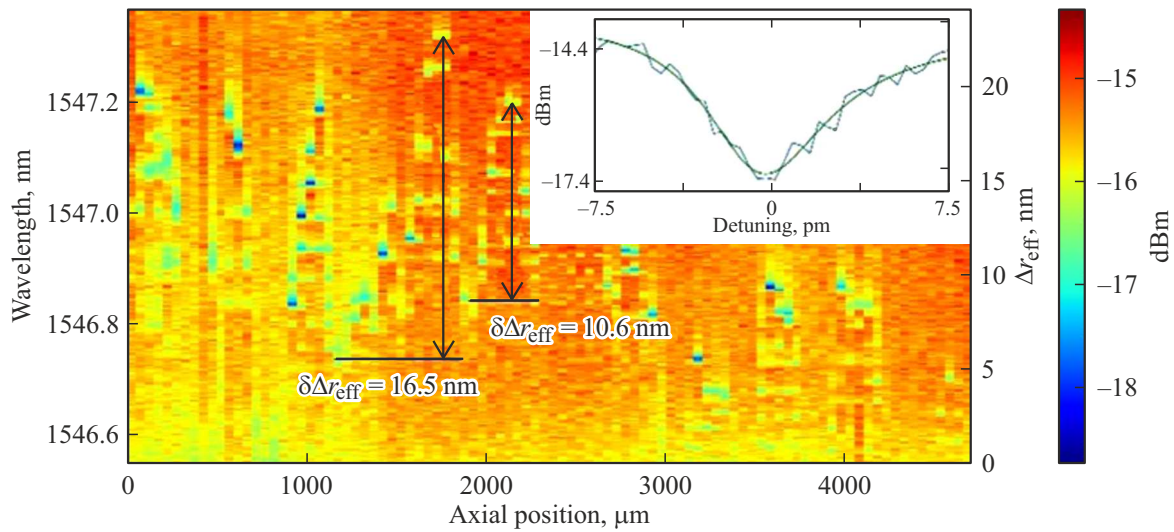


Рис. 6. Спектрограмма образца с глубиной травления $62.5\ \mu\text{m}$. Вставка - спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной $7.19\ \text{pm}$ с добротностью $2.2 \cdot 10^5$.

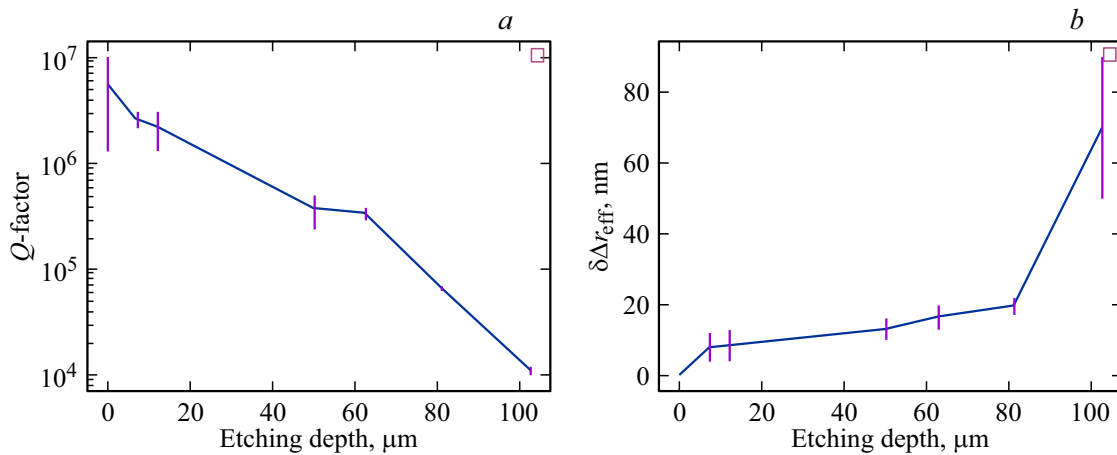


Рис. 7. (a) Зависимость добротности резонансов микрорезонатора от глубины травления (вертикальные отрезки показывают диапазон значений добротности в зависимости от точки микрорезонатора). (b) Зависимость среднего разброса ВЭР микрорезонатора от глубины травления (вертикальные отрезки указывают диапазон 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 $14\ \mu\text{m}$) 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 $50\text{--}65\ \mu\text{m}$ добротность составляла 10^5 , что на порядок меньше, чем в цилиндрическом микрорезонаторе с цельной КО. В образце с наибольшей полученной глубиной травления $102.5\ \mu\text{m}$ 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 $14\ \mu\text{m}$) 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