

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

© Макарова Н.А.^{1,*}, Терентьев В.С.², Ватник И.Д.¹,

¹ Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, Россия

² Институт автоматики и электрометрии,
630090, г. Новосибирск, Россия

*n.makarova@g.nsu.ru

В работе 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 величины 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.

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, внесением вариации 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 кварцевой оболочки свет в режиме МШГ потенциально сможет распространяться и по материалу сердцевины оптоволокна. Если радиус сердцевины будет >10 мкм, 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, даже 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 кварцевой оболочки оптического волокна. Одним из известных методов по удалению кварцевой оболочки 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.

Данная 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 (1):

$$2\pi \cdot R \cdot n = m \cdot \lambda, \quad (1)$$

где m – целое число, представляет 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 $R \cdot n$ будем писать эффективный радиус - r_{eff} . Сделаем некую вариацию эффективного радиуса в микрорезонаторе величиной Δr_{eff} , тогда резонансная длина волны, исходя из уравнения

(1), сместится на $\Delta\lambda$ (2):

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

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

Другим важным параметром, определяющим качество микрорезонатора, является добротность. Величина 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, а $\sigma^2 = \langle f(x, z)^2 \rangle$ – среднеквадратичная шероховатость поверхности.

Из формулы (3) видно, что добротность сильно зависит от размеров неоднородностей на поверхности волокна. Так, для $B = 10$ нм и $\sigma = 1$ нм при излучении с длиной волны 1.5 мкм в оптическом волокне радиусом 50 мкм 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.

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 кварцевая оболочка с поверхности оптического волокна. Далее травленное волокно промывалось дистиллированной водой, чтобы удалить остатки кислоты на поверхности, и отжигалось с помощью нагрева сфокусированного излучения CO₂ лазера для удаления воды с поверхности образца. Этот процесс повторялся несколько раз для того, чтобы понять зависимость глубины травления кварцевой оболочки (разницы между начальным диаметром оптоволокна (125 мкм) и диаметром волокна после травления) от времени травления (рис. 1). Скорость травления составила 4.3 нм/с, что в 11 раз больше,

чем скорость травления такого же волокна в кислоте HF 12%, полученная в [14]. Различие в скоростях 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 мин до 300 мин.

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 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) (рис. 3, (7) – синее волокно). 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 величине сдвига положения 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 подвергнутого 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 величины добротности микрорезонатора. При глубине травления 14 мкм 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 мм вдоль оси микрорезонатора (показано стрелками на рис. 5). В образцах с малой глубиной травления (до 14 мкм) разброс вариации эффективного радиуса $\delta \Delta r_{eff}$ составил единицы нанометров.

С увеличением глубины травления добротность падает. Так, в образце с глубиной травления 62 мкм добротность составляет 2.1 - $3 \cdot 10^5$, что на 1 порядок меньше, чем в образце с глубиной травления 14 мкм. Вдобавок к этому на длине около 0.4 мм вдоль оси микрорезонатора увеличился разброс вариации эффективного радиуса 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 мкм составила 1 - $1.2 \cdot 10^4$, т.е. упала почти на 2 порядка по сравнению с добротностью в микрорезонаторе с глубиной травления 14 мкм.

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 ($\frac{1}{k_z} \sim 50$ мкм

[18]), т.е. никак не влияют на добротность мод микрорезонатора. Тем не 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 мкм разброс ВЭР составляет 1-12 нм на длине 0.5 мм. 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 мкм, разброс ВЭР увеличивается до 20 нм, при этом добротность уменьшается примерно на 1 порядок. Наконец, в образце с глубиной травления 102.5 мкм разброс ВЭР составил 50-90 мкм, а добротность упала на 2 порядка по отношению к добротности микрорезонатора с глубиной травления до 14 мкм (см. 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 в жидкой фазе [20]–[22].

Заключение

В ходе работы было показано, что МШГ возбуждаются в образцах с частично удалённой кварцевой оболочкой (КО) методом травления с помощью HF. В образцах с малой глубиной травления (до 14 мкм) возбуждаются МШГ с добротностью не менее 10^6 , что имеет тот же порядок, как и добротность в образце с целой КО. С увеличением глубины травления добротность микрорезонатора падала вследствие роста шероховатости на поверхности образца. К примеру, в образцах с глубиной травления 50-65 мкм добротность составляла 10^5 , что на порядок меньше, чем в цилиндрическом микрорезонаторе с целой КО. В образце с наибольшей полученной глубиной травления 102.5 мкм 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 целой КО.

С ростом глубины травления увеличивался разброс вариации эффективного радиуса. В образцах с малой глубиной травления (до 14 мкм) разброс вариации эффективного радиуса составлял единицы нм, а в образцах с большой глубиной травления данная величина увеличилась до десятков нм.

Благодарности

Работа Тереньтева В. С. выполнена в рамках темы госзадания Института автоматики и электрометрии СО РАН “Физические основы лазерных и сенсорных систем с использованием структурированных волоконных световодов и микрорезонаторов” (№ гос. рег. 121030500067-5). Работа Макаровой Н. А. и Ватника И. Д. поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (FSUS-2020-0034).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Y. Zheng *et al.*, ‘Sensing and lasing applications of whispering gallery mode microresonators’, *Opto-Electronic Advances*, vol. 1, no. 9, pp. 18001501–18001510, 2018, doi: 10.29026/oea.2018.180015.
- [2] M. Pöllinger and A. Rauschenbeutel, ‘All-optical signal processing at ultra-low powers in bottle microresonators using the Kerr effect’, *Opt. Express, OE*, vol. 18, no. 17, pp. 17764–17775, Aug. 2010, doi: 10.1364/OE.18.017764.
- [3] M. Sumetsky, ‘Delay of Light in an Optical Bottle Resonator with Nanoscale Radius Variation: Dispersionless, Broadband, and Low Loss’, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, no. 16, p. 163901, Oct. 2013, doi: 10.1103/PhysRevLett.111.163901.
- [4] Y. Zhang, T. Zhou, B. Han, A. Zhang, and Y. Zhao, ‘Optical bio-chemical sensors based on whispering gallery mode resonators’, *Nanoscale*, vol. 10, no. 29, pp. 13832–13856, Jul. 2018, doi: 10.1039/C8NR03709D.
- [5] D. O’Shea, C. Junge, M. Pöllinger, A. Vogler, and A. Rauschenbeutel, ‘All-optical switching and strong coupling using tunable whispering-gallery-mode microresonators’, *Appl. Phys. B*, vol. 105, no. 1, p. 129, Sep. 2011, doi: 10.1007/s00340-011-4714-x.
- [6] Y.-F. Xiao, Z.-F. Han, and G.-C. Guo, ‘Quantum computation without strict strong coupling on a silicon chip’, *Phys. Rev. A*, vol. 73, no. 5, p. 052324, May 2006, doi: 10.1103/PhysRevA.73.052324.
- [7] V. Vassiliev and M. Sumetsky, ‘High Q-factor reconfigurable microresonators induced in side-coupled optical fibres’, *Light Sci Appl*, vol. 12, no. 1, p. 197, Aug. 2023, doi: 10.1038/s41377-023-01247-7.
- [8] M. Sumetsky and Y. Dulashko, ‘SNAP: Fabrication of long coupled microresonator chains with sub-angstrom precision’, *Opt. Express, OE*, vol. 20, no. 25, pp. 27896–27901, Dec. 2012, doi: 10.1364/OE.20.027896.
- [9] M. Crespo-Ballesteros, A. B. Matsko, and M. Sumetsky, ‘Optimized frequency comb spectrum of parametrically modulated bottle microresonators’, *Commun Phys*, vol. 6, no. 1, p. 52, Mar. 2023, doi: 10.1038/s42005-023-01168-2.
- [10] V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky, and V. S. Ilchenko, ‘Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes’, *Physics Letters A*, vol. 137, no. 7–8, pp. 393–397, May 1989, doi: 10.1016/0375-9601(89)90912-2.
- [11] V. Dvoyrin and M. Sumetsky, ‘Bottle microresonator broadband and low-repetition-rate frequency comb generator’, *Opt. Lett., OL*, vol. 41, no. 23, pp. 5547–5550, Dec. 2016, doi: 10.1364/OL.41.005547.

- [12] J.-P. Laine, B. E. Little, and H. A. Haus, 'Etch-eroded fiber coupler for whispering-gallery-mode excitation in high-Q silica microspheres', *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 1429–1430, Nov. 1999, doi: 10.1109/68.803068.
- [13] M. L. Gorodetskiĭ, *Opticheskie mikrorezonatory s gigantskoĭ dobrotnost'iu*. in Fundamental'naia i prikladnaia fizika. Moskva: Fizmatlit, 2011.
- [14] N. Toropov, S. Zaki, T. Vartanyan, and M. Sumetsky, 'Microresonator devices lithographically introduced at the optical fiber surface', *Opt. Lett.*, vol. 46, no. 7, p. 1784, Apr. 2021, doi: 10.1364/OL.421104.
- [15] A. Yariv, 'Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides', *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, p. 321, 2000, doi: 10.1049/el:20000340.
- [16] T. A. Birks, J. C. Knight, and T. E. Dimmick, 'High-resolution measurement of the fiber diameter variations using whispering gallery modes and no optical alignment', *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 2, pp. 182–183, Feb. 2000, doi: 10.1109/68.823510.
- [17] M. Sumetsky and Y. Dulashko, 'Radius variation of optical fibers with angstrom accuracy', *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 23, p. 4006, Dec. 2010, doi: 10.1364/OL.35.004006.
- [18] M. Sumetsky, 'Theory of SNAP devices: basic equations and comparison with the experiment', *Opt. Express*, vol. 20, no. 20, p. 22537, Sep. 2012, doi: 10.1364/OE.20.022537.
- [19] L. Wang *et al.*, 'The preparation and characterization of uniform nanoporous structure on glass', *R. Soc. open sci.*, vol. 7, no. 7, p. 192029, Jul. 2020, doi: 10.1098/rsos.192029.
- [20] J. K. Vondeling, 'Fluoride-based etchants for quartz', *J Mater Sci*, vol. 18, no. 1, pp. 304–314, Jan. 1983, doi: 10.1007/BF00543840.
- [21] C. Mazzitelli, M. Ferrari, M. Toledano, E. Osorio, F. Monticelli, and R. Osorio, 'Surface Roughness Analysis of Fiber Post Conditioning Processes', *J Dent Res*, vol. 87, no. 2, pp. 186–190, Feb. 2008, doi: 10.1177/154405910808700204.
- [22] G. A. C. M. Spierings, 'Wet chemical etching of silicate glasses in hydrofluoric acid based solutions', *J Mater Sci*, vol. 28, no. 23, pp. 6261–6273, Dec. 1993, doi: 10.1007/BF01352182.

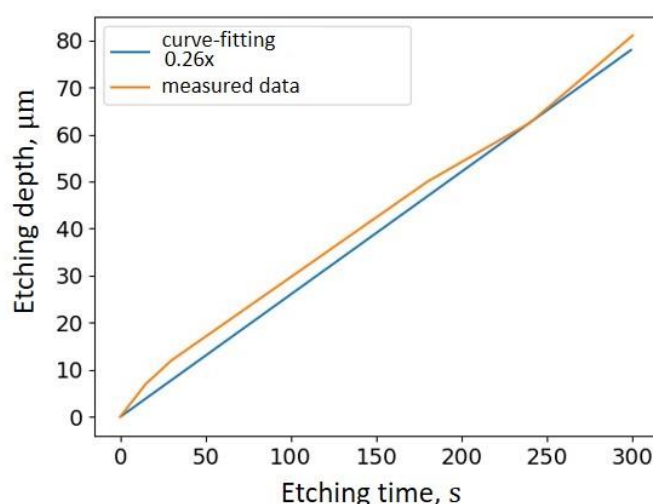


Рис. 1. Скорость травления КО кислотой HF с концентрацией 12.5%

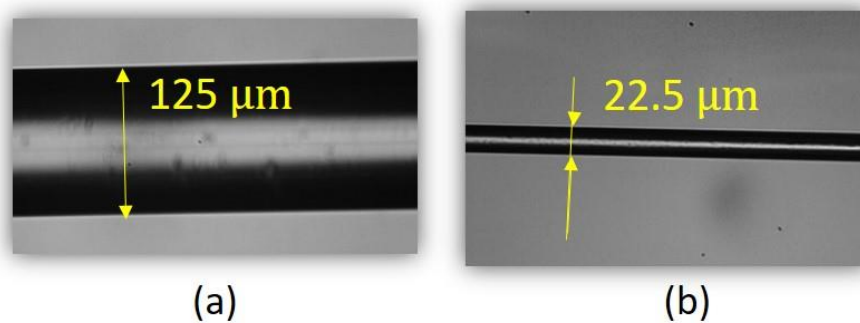


Рис. 2. Образец с КО, частично удаленной методом травления с помощью HF. (а) – до травления, (б) – после травления.

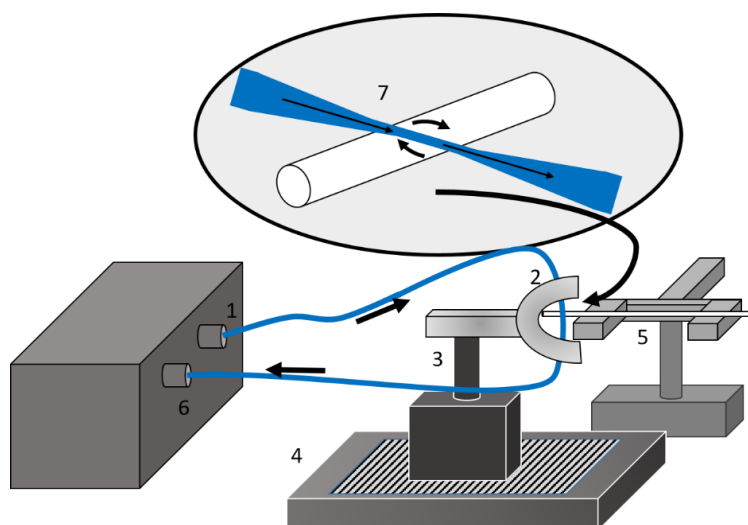


Рис. 3. Установка для измерения спектров пропускания микрорезонатора.
1 – источник излучения, 2 – биконическое волокно, 3 – держатель микроволокна, 4 – подвижка, 5 – образец, 6 – детектор, 7 – область контакта биконического волокна и образца

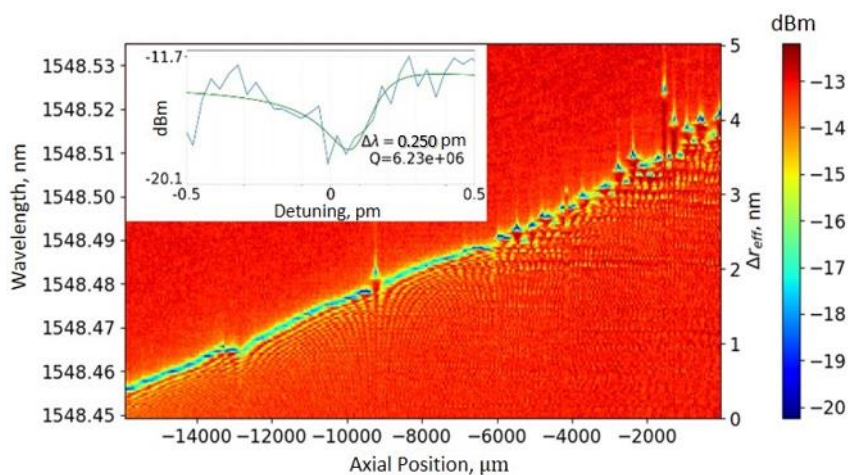


Рис.4. Спектрограмма пропускания немодифицированного волокна.
Радиус КО – 62.5 мкм. Вставка - спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 0.25 пкм и с добротностью $6.2 \cdot 10^6$.

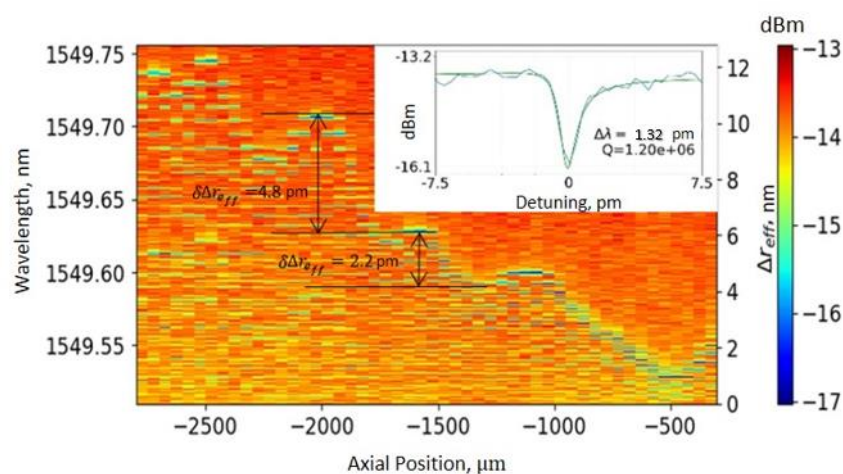


Рис. 5. Спектрограмма образца с глубиной травления 14 мкм. Вставка - спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 1.32 пкм и с добротностью 1.2×10^6 .

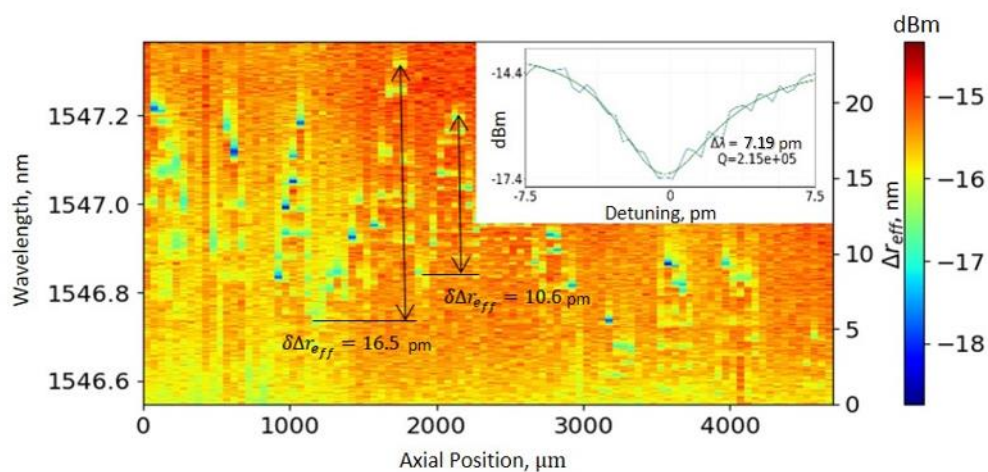


Рис. 6. Спектрограмма образца с глубиной травления 62.5 мкм. Вставка - спектр пропускания, соответствующий отдельному резонансу шириной 7.19 пкм и с добротностью 2.2×10^5 .

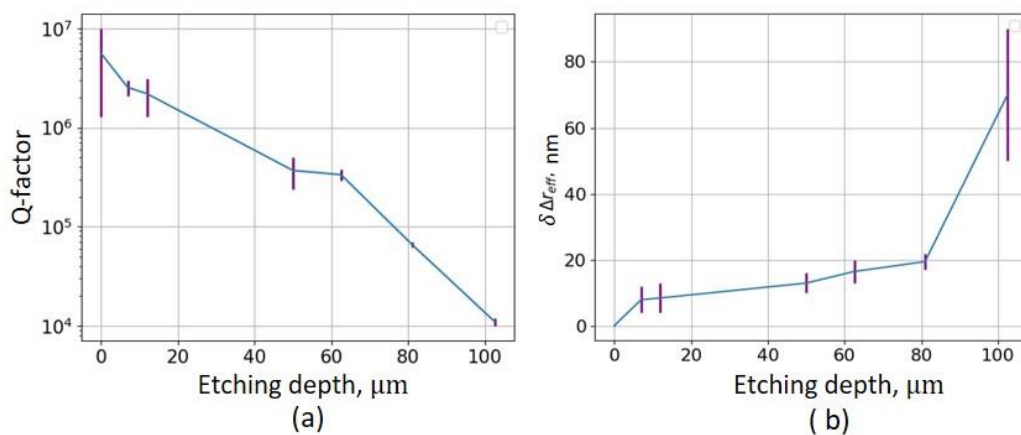


Рис. 7. (а) Зависимость добротности резонансов микрорезонатора от глубины травления (вертикальные линии показывают величину добротности в разных точках микрорезонатора). (б) Зависимость среднего разброса ВЭР микрорезонатора (отрезки погрешностей указывают величину разброса ВЭР в разных точках микрорезонатора)