

УДК 535

Д.В. Кудашкин, И.Д. Ватник

Новосибирский национальный исследовательский университет,
Новосибирск, Россия

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МШГ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКООМНОЙ ПРОВОЛОКИ

Описывается способ изготовления оптических микрорезонаторов мод шепчущей галереи (МШГ) на основе оптического волокна с использованием никель-хромовой проволоки. Приведённый метод позволяет изготавливать оптические МШГ микрорезонаторы с высокой воспроизводимостью с низкой относительно других методов стоимостью.

Ключевые слова: оптическое волокно, моды шепчущей галереи, оптические микрорезонаторы, волоконная оптика.

D.V. Kudashkin, I.D. Vatnik

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

FABRICATION OF OPTICAL WGM MICROCAVITIES USING HIGH-RESISTANCE WIRE

This paper describes a method for fabricating whispering gallery mode (WGM) optical microcavities based on optical fiber using a nickel-chromium wire. The above method makes it possible to manufacture optical WGM microcavities with high reproducibility and low cost compared to other methods.

Keywords: optical fiber, whispering gallery modes, optical microresonators, fiber optics.

Введение

Микрорезонаторы оптических мод шепчущей галереи (МШГ) могут использоваться для генерации нелинейных эффектов благодаря их высокой добротности (до 10^{10}) и малого объема моды [1, 2]. В настоящее время распространены способы изготовления кварцевых микрорезонаторов МШГ, в основе которых лежит плавление. Плавку можно проводить в пламени с помощью CO₂-лазера, в дуговом разряде и в электронагревателе (см. [1, 3] и ссылки в них). Однако процесс плавления не является точно воспроизводимым, и, как правило, точность контроля радиуса ограничивается несколькими микронами [3].

Точность можно повысить с помощью постобработки, например химического травления [4].

Среди различных кварцевых микрорезонаторов МШГ есть подкласс резонаторов SNAP (Surface Nanoscale Axial Photonics), изготавливаемых с гораздо большей точностью. Суть подхода заключается в создании оптических микрорезонаторов на поверхности обычного оптического волокна путем внесения наноразмерной деформации его поверхности. Такие резонаторы могут иметь добротность до 10^8 [5] и обеспечивают возможность точного управления распространением МШГ вдоль оси волокна, и таким образом на их основе возможно создание новых фотонных устройств, таких как линии задержки, оптические датчики или генераторы оптических комбов с низкой частотой повторения [5–8]. Однако размеры поверхностных вариаций требуют более высокой точности изготовления.

Сегодня разработано несколько методов изготовления SNAP: отжиг CO_2 -лазером [9], высвобождение замороженных напряжений оптоволокна фемтосекундным лазером [9], изгиб волокна [10], отжиг в пламени [11], медленный нагрев водой [8], литография волокна [7] и др. [6]. Каждый из этих методов имеет определенные преимущества и ограничения. Методы, основанные на нагреве, снимают внутренние напряжения материала, при этом вязкость кварца сильно зависит от температуры [12]. Таким образом, даже небольшие колебания температуры приводят к неравномерному введению вариаций эффективного радиуса, что обеспечивает недостаточную воспроизводимость при нагреве CO_2 -лазером или отжиге пламенем. Субангстремная точность может быть достигнута с помощью этих методов при использовании методов коррекции [6]. Простой метод отжига пламенем также имеет ограничение, поскольку введенный профиль изменения связан с размером и распределением тепла в языке пламени. Аналогичным образом подход с изгибом волокна не позволяет изготавливать микрорезонаторы с малым размером вдоль оси волокна, так как последний ограничен профилем вводимых при изгибе напряжений [10].

В данной статье мы представляем новый простой метод изготовления микрорезонаторов, основанный на нагреве высокоомной проволоки постоянным электрическим током. Метод позволяет изготавливать микрорезонаторы небольшого размера вдоль оси волокна с высо-

кой воспроизводимостью за счет лучшего контроля температуры проволоки и является надежным и простым в реализации методом модификации.

Схема установки

Установка для создания микрорезонаторов состоит из источника тока, соединенного с нихромовой проволокой. Использовались проволоки диаметром в диапазоне 80–200 мкм. Благодаря высокому сопротивлению проволока способна нагреваться до температур, близких к температуре стеклования кварца, и температура перегорания проволоки составляет 1100 °С по спецификации, указанной производителем. Определим критический ток как ток, при котором перегорает проволока, а рабочий ток задаем чуть меньше критического. Благодаря тому, что ток в проводе можно установить постоянным с высокой точностью, удастся избежать колебаний температуры, присущих другим методам. В результате можно создавать микрорезонаторы с более высокой степенью повторяемости.

Мы обнаружили, что происходит испарение материала с поверхности нагретой проволоки, которое осаждается на поверхности микрорезонатора, тем самым портя его. Во избежание загрязнения проволока помещается в кремниевый микрокапилляр с толщиной стенки 10 мкм и диаметром от 100 до 500 мкм. Волокно, образующее микрорезонатор, закреплено на механическом трехкоординатном столике и располагается перпендикулярно капилляру с возможностью перемещения вдоль оси волокна. Это позволяет вводить различные вариации радиуса вдоль волокна. Схематическое изображение установки приведено на рис. 1.

Для определения величины введенных вариаций радиуса мы исследовали мощность спектра пропускания $P(\lambda, z)$ микрорезонаторов, возбуждаемых вытянутым волокном. Такое волокно расположено перпендикулярно микрорезонатору и способно перемещаться вдоль его оси, измеряя спектры пропускания в разных точках z . Для спектральных измерений использовался оптический анализатор спектра «Luna» с разрешением 1,6 мкм. Более подробно процесс сканирования описан в работе [13].

Набор спектров мощности пропускания вдоль оси микрорезонатора образует спектрограмму, включающую моды с различными аксиальными квантовыми числами, которые определяются осевым распре-

делением эффективного радиуса через уравнение Шредингера [6]. В упрощенном виде для достаточно больших вариаций радиуса условие резонанса для моды с наибольшей длиной волны дается формулой

$$2\pi n(z)R(z) = m\lambda(z),$$

где m – азимутальное квантовое число МШГ, $\lambda(z)$ – резонансная длина волны моды с наименьшим азимутальным квантовым числом (с наибольшей длиной волны), измеренная в положении конуса z , R – радиус волокна, n – показатель преломления кварца. Используя эту формулу, можно получить изменение эффективного радиуса $R_{eff}(z) = n(z)R(z)$ микрорезонатора из спектрограммы пропускания как $\Delta R_{eff}(z) = Rn\lambda(z) - \lambda_0/\lambda_0$, где λ_0 – резонанс на немодифицированном участке волокна.

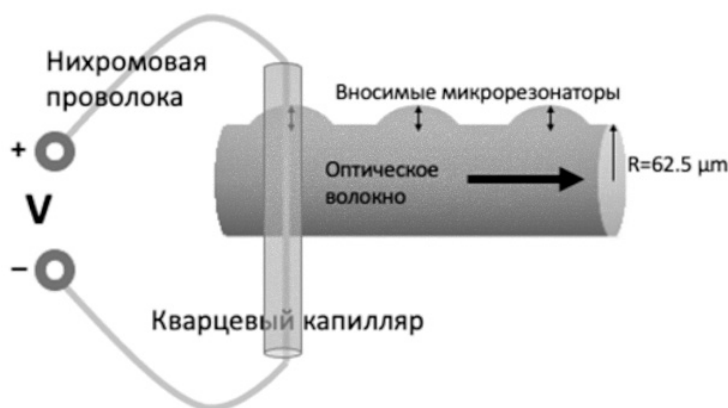


Рис. 1. Схема установки для создания микрорезонаторов

Форма эффективной вариации радиуса для фиксированного положения капилляра

Сначала мы изучили эффективную вариацию радиуса, создаваемую проволокой, касающейся волокна в фиксированном положении в одной точке по оси z . Для этого мы модифицировали поверхность оптического волокна диаметром 125 мкм, используя капилляр диаметром 300 мкм и проволокой диаметром 200 мкм внутри.

Модификация имеет практически треугольный профиль R_{eff} вдоль оси волокна при общей длине 600 мкм (рис. 2, а). Треугольная форма

хорошо соответствует стационарному тепловому распределению, полученному из уравнения теплопроводности с постоянным тепловым потоком на границах и точечным источником тепла в центре.

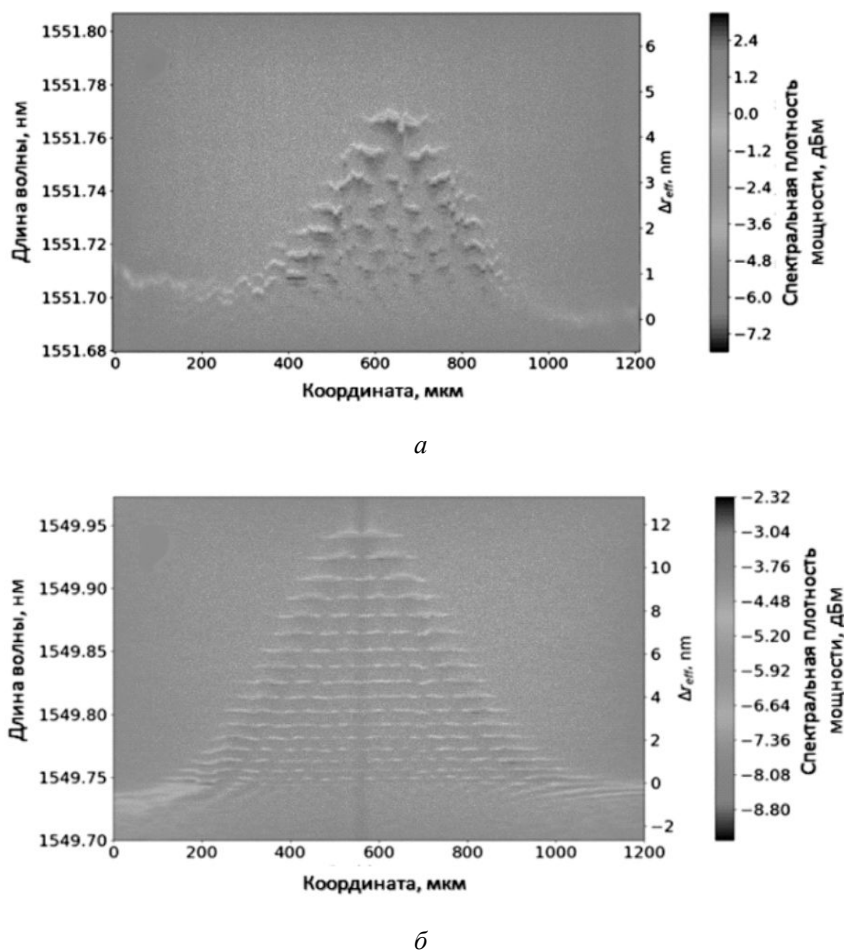


Рис. 2. Капилляр диаметром 300 мкм (а), из которого изготовлен резонатор; расчетная ширина ~600 мкм; капилляр диаметром 500 мкм (б); из которого изготовлен резонатор; расчетная ширина ~1000 мкм

Мы обнаружили, что нет разницы в осевом размере микрорезонатора, полученного с использованием капилляров диаметром 100 и 300 мкм. Однако для капилляра диаметром 500 мкм наблюдается уширение вносимой модификации вдоль оси модифицируемого волокна по сравнению с микрокапилляром меньшего диаметра (рис. 2, б).

Линейная зависимость вариации радиуса от времени нагрева

Для контроля точного значения изменения эффективного радиуса ΔR_{eff} предлагается варьировать время, в течение которого вносится модификация, т.е. время нахождения нагретой проволоки в контакте с волокном. Для демонстрации этого подхода образец волокна нагревали проволокой в четырех различных точках вдоль волокна (рис. 3). Расчетное значение $\Delta R_{eff}(z)$ в максимуме линейно растёт со временем модификации, заметим, что при достаточно длительном нагреве наблюдается насыщение, и ΔR_{eff} перестаёт расти. Линейность открывает возможности для создания оптических потенциалов заданной ширины и формы. В работе [6] показано, что для CO_2 -лазера насыщение происходит при $\Delta R_{eff} = 23$ нм, в наших экспериментах насыщение достигалось при размере модификации 12–13 нм, при этом он зависит от температуры проволоки.

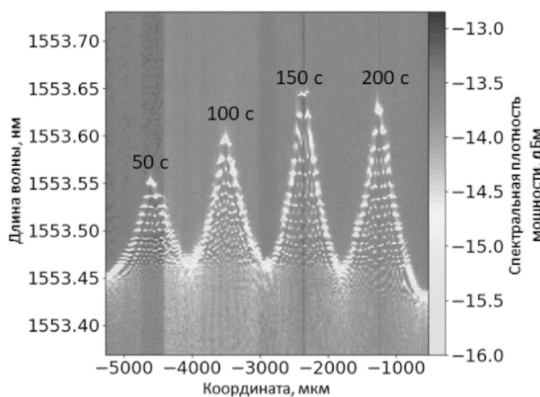


Рис. 3. Линейная зависимость размера вносимого микрорезонатора от времени нагрева

Воспроизводимость

Чтобы убедиться, что постоянная температура проволоки действительно повышает воспроизводимость вносимых модификаций, мы сравнили форму ΔR_{eff} для трех модификаций, выполненных на поверхности волокна при одинаковых условиях, т.е. при одинаковых токе и расстоянии от капилляра до волокна.

Для изготовления использовали капилляр диаметром 500 мкм (рис. 4). Полученные вариации эффективного радиуса в максимумах ΔR_{eff} оказались практически одинаковыми.

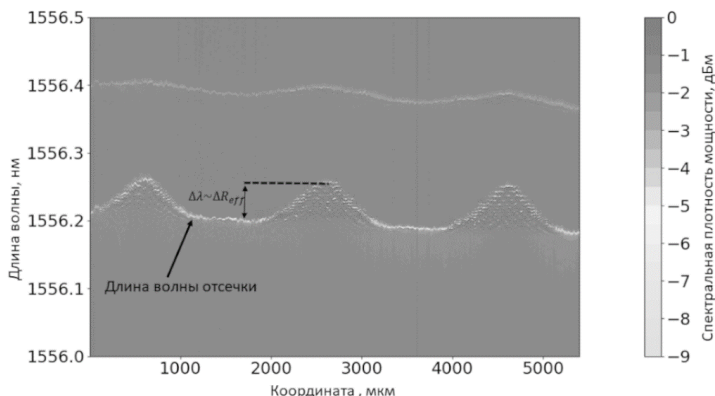


Рис. 4. Набор из трёх идентичных микрорезонаторов

Расхождение при использовании данного метода может достигать до 0,09 нм. Отметим, что этот уровень погрешности определяется аппаратной погрешностью определения абсолютной длины волны (1,6 пм).

Изготовление плоских микрорезонаторов

Благодаря высокой повторяемости и линейности введения модификаций возможно создание микрорезонаторов произвольной формы. В качестве примера мы внесли профиль с плоской вершиной (рис. 5).

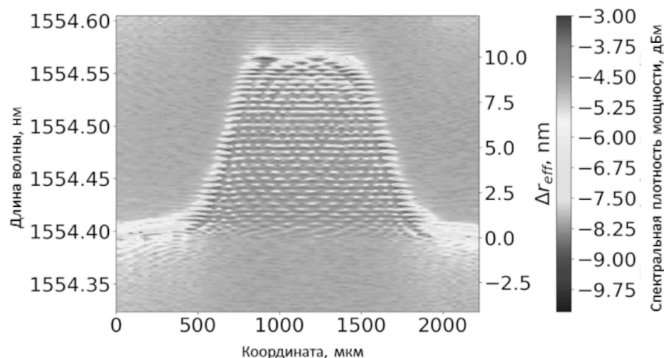


Рис. 5. Плоский микрорезонатор

Плоская часть длиной 0,6 мм была создана путем нагрева в разных точках через каждые 200 микрон вдоль оси волокна при одинаковом времени нагрева 150 с. С помощью проволоки удалось создать микрорезонатор с протяжённостью основной моды 0,6 мм, т.е. точности внесения вариации радиуса было достаточно, чтобы создать в каждой точке, где вносилась модификация поверхности, одинаковое изменение эффективного радиуса.

Заключение

Мы предложили простой метод изготовления микрорезонаторов SNAP, позволяющий создавать микрорезонаторы с высокой повторяемостью. Измеренная точность введенных вариаций без дополнительной постобработки оказалась менее 1 ангстрема. Благодаря малой скорости введения изменения радиуса и линейной зависимости от времени этот метод может быть легко использован совместно с другими методами коррекции формы микрорезонатора.

Список литературы

1. Gorodetsky M.L., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S. Ultimate Q of optical microsphere resonators // *Optics Letters*. – 1996. – Vol. 21, № 7. – P. 453–455.
2. Schliesser A., Kippenberg T.J. Cavity optomechanics with whispering-gallery mode optical micro-resonators // *Advances In Atomic, Molecular and Optical Physics*. – 2010. – Vol. 58. – P. 207–323.
3. Ultrahigh-Q tunable whispering-gallery-mode microresonator / M. Pöllinger [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 103, № 5. – P. 053901.
4. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip / H. Lee [et al.] // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6, № 6. – P. 369–373.
5. Effects of end surface and angle coupling on mode splitting and suppression in a cylindrical microcavity / J. Wang [et al.] // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, № 7. – P. 1752–1756.
6. Sumetsky M. Optical bottle microresonators // *Progress in Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 64. – P. 1–30.
7. Microresonator devices lithographically introduced at the optical fiber surface / N. Toropov [et al.] // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46, № 7. – P. 1784–1787.

8. Photonic microresonators created by slow optical cooking / G. Gardosi [et al.] // *ACS Photonics*. – 2021. – Vol. 8, № 2. – P. 436–442.

9. Fabrication of surface nanoscale axial photonics structures with a femtosecond laser / F. Shen [et al.] // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, № 12. – P. 2795–2798.

10. SNAP microresonators introduced by strong bending of optical fibers / D. Bocek [et al.] // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44, № 13. – P. 3218.

11. Sumetsky M., Vassiliev V. Angstrom-precise fabrication of surface nanoscale axial photonics (SNAP) microresonators with a flame // *Laser Physics Letters*. – 2022. – Vol. 19, № 5. – P. 056202.

12. Scholze H. Glass: Nature, structure and properties // New York, NY: Springer. – 1991. – 454 p.

13. Dulashko Y., Sumetsky M. Radius variation of optical fibers with angstrom accuracy // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35, № 23. – P. 4006–4008.

14. Демченко Ю.А., Городецкий М.Л. Влияние адсорбированного слоя на резонансные частоты и добротность сферических микрорезонаторов // *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия*. – 2015. – № 3.

References

1. Gorodetsky M.L., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S. Ultimate Q of optical microsphere resonators. *Optics Letters*, 1996, vol. 21, no. 7, pp. 453–455.

2. Schliesser A., Kippenberg T.J. Cavity optomechanics with whispering-gallery mode optical micro-resonators. *Advances In Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2010, vol. 58, pp. 207–323.

3. Pöllinger M. et al. Ultrahigh-Q tunable whispering-gallery-mode microresonator. *Physical Review Letters*, 2009, vol. 103, no. 5, p. 053901.

4. Lee H. et al. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip. *Nature Photonics*, 2012, vol. 6, no. 6, pp. 369–373.

5. Wang J. et al. Effects of end surface and angle coupling on mode splitting and suppression in a cylindrical microcavity. *Applied Optics*, 2019, vol. 58, no. 7, pp. 1752–1756.

6. Sumetsky M. Optical bottle microresonators. *Progress in Quantum Electronics*, 2019, vol. 64, pp. 1–30.

7. Toropov N. et al. Microresonator devices lithographically introduced at the optical fiber surface. *Optics Letters*, 2021, vol. 46, no. 7, pp. 1784–1787.

8. Gardosi G. et al. Photonic microresonators created by slow optical cooking. *ACS Photonics*, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 436-442.
9. Shen F. et al. Fabrication of surface nanoscale axial photonics structures with a femtosecond laser. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 12, pp. 2795-2798.
10. Bocek D. et al. SNAP microresonators introduced by strong bending of optical fibers. *Optics Letters*, 2019, vol. 44, no. 13, p. 3218.
11. Sumetsky M., Vassiliev V. Angstrom-precise fabrication of surface nanoscale axial photonics (SNAP) microresonators with a flame. *Laser Physics Letters*, 2022, vol. 19, no. 5, p. 056202.
12. Scholze H. Glass: Nature, Structure, and Properties. New York, NY, Springer, 1991, 454 p.
13. Dulashko Y., Sumetsky M. Radius variation of optical fibers with angstrom accuracy. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 23, pp. 4006-4008.
14. Demchenko Ju.A., Gorodeckij M.L. Vliyanie adsorbirovannogo sloja na rezonansnye chastoty i dobrotnost' sfericheskikh mikkrorezonatorov [Influence of the adsorbed layer on the resonant frequencies and quality factor of spherical microcavities]. *MSU Vestnik Series 3*, 2015, no. 3.

Сведения об авторах

КУДАШКИН Д.В.

e-mail: d.kudashkin@g.nsu.ru

Младший научный сотрудник Лаборатории волоконных лазеров Новосибирского государственного университета, г. Новосибирск.

ВАТНИК И.Д.

e-mail: i.vatnik@nsu.ru

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории волоконных лазеров Новосибирского государственного университета, г. Новосибирск

About the authors

KUDASHKIN D.V.

e-mail: d.kudashkin@g.nsu.ru

Junior Research Fellow, Laboratory of fiber lasers, Novosibirsk State University, Novosibirsk.

VATNIK I.D.

e-mail: i.vatnik@nsu.ru

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow, Laboratory of fiber lasers, Novosibirsk State University, Novosibirsk

Финансирование. Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (FSUS-2020-0034).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Получена: 16.09.2023

Одобрена: 20.09.2023

Принята к публикации: 21.09.2023

Financing. Financing. This work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science (FSUS-2020-0034).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions is 100 %.

Received: 16/09/2023

Approved: 20/09/2023

Accepted for publication: 21/09/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Кудашкин, Д.В. Изготовление оптических МШГ микрорезонаторов с помощью высокоомной проволоки / Д.В. Кудашкин, И.Д. Ватник // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 32–42.

Please cite this article in English as: Kudashkin D.V., Vatik I.D. Fabrication of optical WGM microcavities using high-resistance wire // Applied photonics, 2023, no. 5, pp. 32-42.