Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 11, с. 763 – 768

Цилиндрические микрорезонаторы из кремния и нитрида кремния, изготовленные из оптических волокон методом магнетронного напыления

Н. А. Макарова[+1)], *В. С. Терентьев*[*], *И. Д. Ватник*[+*]

[+]*Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия*

[*]*Институт автоматики и электрометрии, 630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 19 сентября 2025 г.
После переработки 21 октября 2025 г.
Принята к публикации 31 октября 2025 г.

Цилиндрический микрорезонатор на основе стандартных кварцевых оптических волокон является перспективной простой платформой для создания нелинейных устройств, но требует высокой мощности накачки для наблюдения нелинейных эффектов. В работе рассматривается возможность магнетронного напыления тонких пленок с более высоким нелинейным показателем преломления из слоев кремния и нитрида кремния, обладающих большим нелинейным показателем преломления. Показано, что добротность в процессе напыления падает до величин 10^5 для пленок кремния и 10^6 для пленок нитрида кремния.

DOI: 10.31857/S0370274X25120093

Одним из перспективных типов микрорезонаторов является цилиндрический микрорезонатор на основе кварцевых оптических волокон. Его преимуществом является простота изготовления,поскольку для этого достаточно удалить с коммерчески доступного телекоммуникационного оптического волокна защитную пластиковую оболочку. Как оказывается,качество поверхности кварцевой оболочки достаточно высокое, чтобы поддерживать моды шепчущей галереи (МШГ) с добротностью вплоть до 10^8 [1]. Кроме того,можно прецизионным способом создавать локальные вариации геометрического радиуса $r(z)$ или эффективного радиуса $r_{\mathrm{eff}}(z) = r(z)n(z)$ (здесь n – показатель преломления, z – координата вдоль оси цилиндра), и таким образом управлять структурой мод и их распределением вдоль оси волокна [2]. Получаемые квазицилиндрические микрорезонаторы имеют ряд специфических применений. К примеру, благодаря медленному распространению света вдоль оси волокна, микрорезонаторы могут быть использованы в качестве линий задержки [3]. Также благодаря высокой чувствительности МШГ к изменению в окружающей среде можно создавать распределенные сенсоры на основе микрокапилляров [4]. МШГ-микрорезонаторы на волокне могут быть использованы для наблюдения нелинейных эффектов [5]. К примеру, в микрорезонаторе за счет керровской нелинейности при определенных условиях генерируется оптическая частотная гребенка (ОЧГ) [1], частота повторения которой может быть на порядки ниже частот повторения в других типах микрорезонаторов за счет малой области свободной дисперсии (ОСД) мод, имеющих разное аксиальное распределение вдоль цилиндра [6]. Однако, в цилиндрическом микрорезонаторе на основе стандартного оптоволокна порог генерации ОЧГ может достигать нескольких ватт [5]. Одним из способов снизить порог генерации ОЧГ является увеличение нелинейности с помощью нанесения высоконелинейного материала на поверхность микрорезонатора. При определенной толщине напыленного слоя свет в режиме МШГ будет распространяться в напыленном высоконелинейном материале, и лишь малая доля света будет утекать внутрь оптического волокна. Так как пороговая мощность для наблюдения нелинейных эффектов обратно пропорциональна первой степени нелинейного показателя преломления и квадрату добротности, для успешного достижения порога нелинейности необходима гладкая и однородная поверхность микрорезонатора с высокой плотностью и малым поглощением материала в приповерхностной области, чтобы добротность резонатора не уменьшалась.

Нами предложено увеличить нелинейность в микрорезонаторах на основе кварцевого волокна напылением высоконелинейных материалов. Первым высоконелинейным материалом стал кремний с нели-

[1)]e-mail: n.makarova@g.nsu.ru

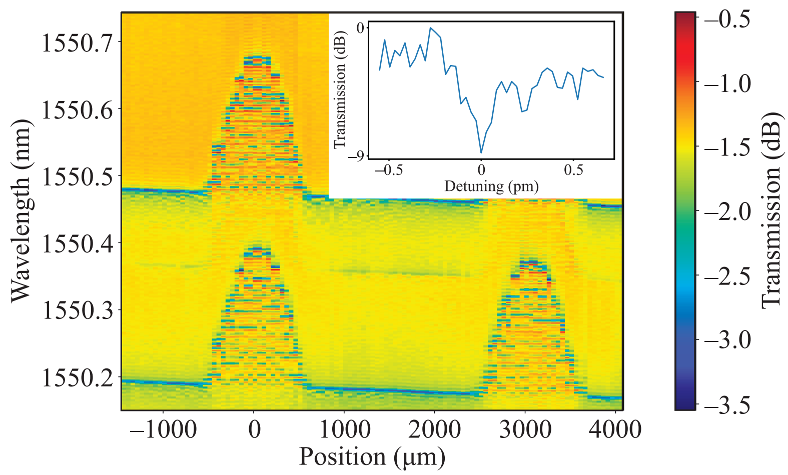

Рис. 1. (Цветная онлайн) Спектрограмма МШГ образца до напыления.Шаг сканирования вдоль $z - 50$ мкм. Вставка – спектр пропускания, снятый в высоком разрешении (0.04 пм) и соответствующий отдельному резонансу

нейным показателем на 2 порядка больше, чем у оксида кремния. Хотя в кремнии на длинах волн около 1.5 мкм существенными становятся нелинейные потери за счет двухфотонного поглощения, которые обычно препятствуют генерации частотных гребенок, при помощи специальных методов такая генерация достижима [7]. Вторым высоконелинейным материалом выбран нитрид кремния Si_3N_4 с нелинейным показателем преломления на 1 порядок больше, чем у оксида кремния. Нами изучены основные параметры цилиндрического микрорезонатора – добротность и возникающие из-за неравномерного по длине напыления вариации эффективного радиуса. Дополнительно была оценена доля мощности света в напыленном слое.

Процесс подготовки образцов микрорезонаторов включал очистку оптического волокна от защитной пластиковой оболочки, его отжиг и создание вариаций эффективного радиуса кварцевой оболочки [8]. Предварительно были подобраны параметры излучения CO_2-лазера, обеспечивающие плавный и однородный отжиг поверхности образца. Пучок фокусировался с помощью цилиндрической линзы, образец помещался в фокус линзы. Отжиг отрезка стандартного волокна SMF-28 длиной 2 см проводился при мощности лазера 5.7 Вт перемещением фокуса излучения вдоль образца со скоростью 5 мм/с. После этого в образце формировали две локальные вариации радиуса параболической формы с использованием той же установки. Параболические ВЭР были расположены на расстоянии 3 мм друг от друга (рис 1).Для формирования каждой из них образец облучался серией лазерных импульсов длительностью 400 мс и мощностью 9.5 Вт. Созданные области служили контрольными зонами для сравнения параметров образцов до и после напыления.

Возбуждение МШГ в исследуемом образце осуществляется путем подведения биконического тянутого волокна (тейпера) в непосредственный контакт с образцом. Тейпер в этом случае располагается перпендикулярно оси образца, касаясь его своей перетяжкой. За счет равномерно сужающейся биконической формы тейпера излучение, проходящее по тейперу, испытывает эффект нарушенного полного внутреннего отражения и частично утекает в исследуемый образец, возбуждая МШГ на резонансных длинах волн, определяемых выражением

$$2\pi \cdot r(z) \cdot n_{m,p}(z) = m \cdot \lambda_{m,p}(z). \qquad (1)$$

Здесь $n_{m,p}$ – это некий эффективный коэффициент преломления, который зависит и от азимутального числа m, и от радиального p для конкретной возбуждаемой моды.

По величине изменения положения провала в спектре можно рассчитать вариацию эффективного радиуса $\Delta r_{\text{eff}}(z)$ по формуле

$$\frac{\Delta\lambda_{m,p}(z)}{\lambda_{m,p}} = \frac{\Delta r_{\text{eff}}(z)}{r_{\text{eff}}}, \qquad (2)$$

где $\Delta r_{\text{eff}}(z) = \Delta(r(z) n_{m,p}(z))$, а $r_{\text{eff}} = 62.5$ мкм $\times$ 1.5 – эффективный радиус невозмущенного цилиндра.

В процессе сканирования тейпер перемещается вдоль образца, возбуждая при этом МШГ в разных точках микрорезонатора. Так строится спектрограмма – зависимость спектра пропускания и длины волны резонанса с некоторыми азимутальным, радиальным и поляризационным числами от координаты образца, т.е.снимается вид профиля модификации образца $\Delta r_{\mathrm{eff}}(z)$.

В качестве первого нелинейного напыленного материала был использован кремний. Спектрограмма образца, созданного на основе стандартного кварцевого волокна с диаметром 125 мкм, подготовленного для напыления, показана на рис. 1. Спектры образца измерялись с помощью оптического векторного анализатора Luna OVA5000 с разрешением 1.6 пм с диапазоном сканирования от 1525 до 1610 нм. Мощность встроенного в OVA5000 перестраиваемого лазера составляет порядка 100 мкВт. Спектрограмма содержит в себе две линии, отвечающие резонансам МШГ с разными азимутально-радиальными квантовыми числами. В областях, в которых была внесена вариация эффективного радиуса, происходит увеличение резонансных длин волн каждой из мод в соответствии с формулой (2). Потери каждой из мод, определяющие ширину спектральной линии, зависят от точки измерения, поскольку тейпер, находящийся в физическом контакте с образцом, вносит дополнительные потери [9]. В точке, где влияние тейпера минимально (на краю продольного распределения моды) была определена собственная добротность такого микрорезонатора измерением с помощью высокоразрешающего спектрального анализатора APEX A2050 (разрешение 0.04 пм). Добротность до напыления составила $7 \cdot 10^6$.

Напыление кремния на поверхность образца было выполнено с помощью магнетронной установки. В установке использовались круглые магнетроны диаметром 3″ с кремниевой мишенью (чистота 99.999 %). Стабилизация импульсного однополярного разряда с коэффициентом заполнения 10 % и частотой 16 кГц производилась по напряжению 1000 В, при среднем токе 0.3 А. Вакуумная камера перед напылением откачивалась до давления $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. При напылении поддерживалось давление $1.5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. аргона высшего сорта (99.998 %). Волокно закреплялось в специальном фиксаторе параллельно поверхности магнетронной мишени. При этом фиксатор, закрепленный на оси моторчика, непрерывно поворачивал волокно вокруг его оси, тем самым приводил к равномерному осаждению слоя на боковую поверхность. Напыление длилось 436 с. После напыления микрорезонатор отжигался в специальной печи при температуре 500 °C на протяжении 5 ч с равномерным нагревом в течении двух часов и охлаждением в течении 15 ч. Толщина напыленной пленки определялась по измеренной ранее скорости напыления и заданного времени напыления, и составляла 400 нм. После отжига в образце с напыленной оболочкой из кремния были возбуждены МШГ. Спектрограмма МШГ образца после напыления показана на рис. 2.

Видно, что вдоль образца возникает неоднородная вариация эффективного радиуса, связанная с напылением (рис. 2a). Примечательно, что в спектрограмме присутствуют резонансы, отвечающие разным радиальным числам (т.е. модам, простирающимся вглубь цилиндра на разную глубину), которые испытывают разный сдвиг резонансов в результате напыления (см. черную и синюю линии, выделенные в спектрограмме на рис. 2b). Действительно, на моды, имеющие более высокие радиальные числа q, наличие тонкой пленки кремния на поверхности цилиндра должно оказывать меньшее влияние.

Толщина слоя 400 нм, полученная в центре образца (в области изначально внесенных в образец локальных неоднородностей), уменьшалась до < 100 нм по краям образца. Максимальная добротность микрорезонатора с напыленной оболочкой из кремния составила 10^5 (рис. 2a).

Для оценки пороговой мощности P_{th}, необходимой для наблюдения нелинейных эффектов до и после напыления, использовалась зависимость для случая критической связи между микрорезонатором и элементом возбуждения [10]

$$P_{\mathrm{th}} = \frac{\pi \cdot n_0^2 \cdot V}{\lambda \cdot Q^2 \cdot n_2}, \tag{3}$$

где n_0 – линейный показатель преломления, n_2 – нелинейный показатель преломления, V – объем моды.

Отношение пороговых мощностей, определенных с помощью формулы (3), для образца с внешней оболочкой из оксида кремния (до напыления) и для образца с внешней оболочкой из кремния (после напыления) составило 37, т.е. мы не получили выигрыш в пороговой мощности при напылении кремния.

Для определения возможных причин, приводящих к ухудшению добротности, был проведен анализ качества напыляемой пленки косвенными оптическими методам. Для этого было проведено измерение спектра пропускания образца в широком спектральном диапазоне 1525–1610 нм. Поскольку в этот спектральный диапазон попадает несколько резонансов с отличающимися азимутальными числами, появляется возможность определить ОСД, определяемую как разность частот для резонансов с азимутальными числами m и $m+1$. Для большей точности ОСД определялась по максимуму автокорреляционной функции спектра пропускания.Для образца с напыленной пленкой кремния ОСД составила 2.1 нм.

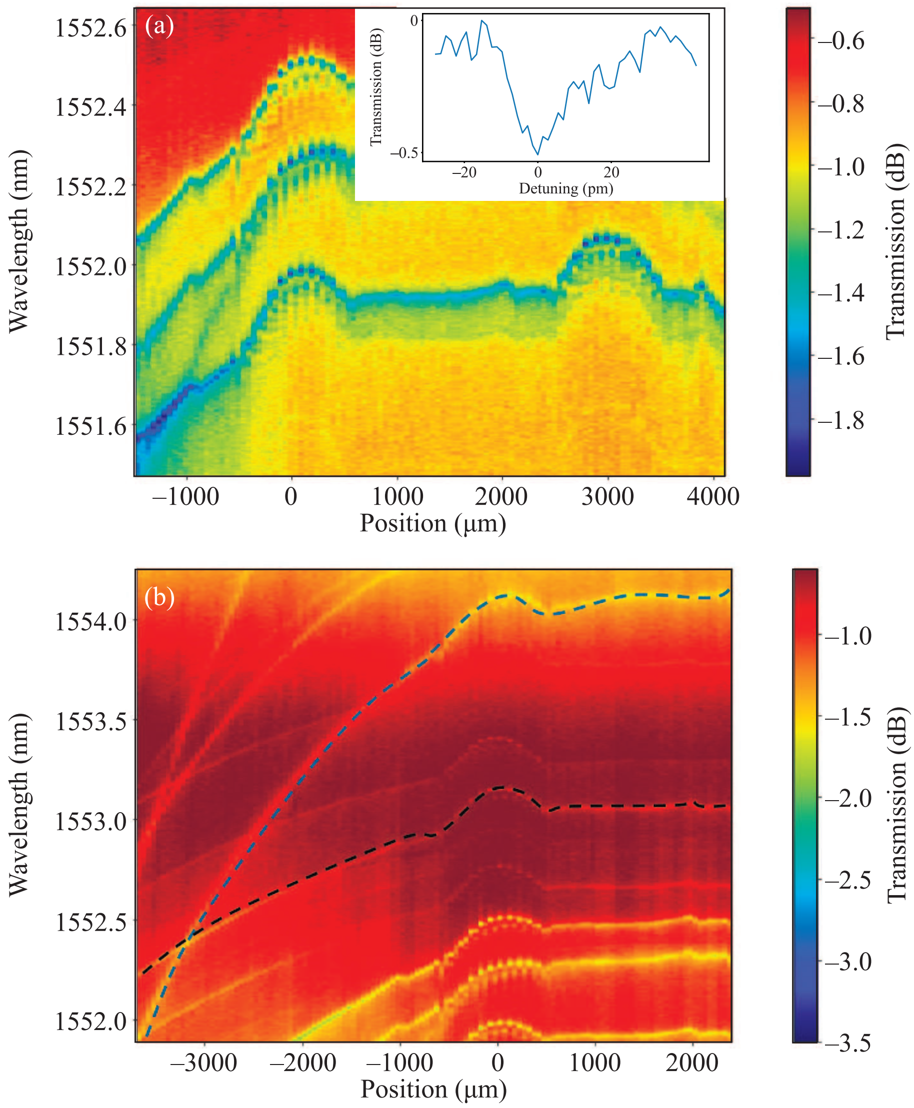

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Спектрограмма МШГ образца после напыления кремния, указывающая положение контрольных областей. Вставка – спектр пропускания, снятый в высоком разрешении и соответствующий отдельному резонансу. (b) – Другая часть спектрограммы, в которой синей и черной пунктирными линиями отмечены моды с такими радиальными числами q_1 и q_2 соответственно, что $q_1 < q_2$

В соответствии с формулой (1), измеренная ОСД позволяет определить эффективный показатель преломления моды

$$n_{m,p} = \frac{\lambda \cdot (\lambda + \text{ОСД})}{2\pi r \cdot \text{ОСД}}. \tag{4}$$

Оцененная таким образом величина $n_{m,p}$ составила 2.9, т.е. оказалась существенно меньше коэффициента преломления кремния ($n_{\mathrm{Si}} = 3.47$), но больше коэффициента преломления оксида кремния ($n_{\mathrm{SiO_2}} = 1.47$). Понятно, что эффективный показатель преломления будет близок к n_{Si}, если мода шепчущей галереи распространяется полностью в напыленной пленке, и близок к $n_{\mathrm{SiO_2}}$, если толщина напыленной пленки будет пренебрежимо мала. Грубая оценка доли энергии моды D, существующей в напыленном слое, может быть сделана по формуле

$$D = \frac{n - n_{\mathrm{SiO_2}}}{n_{\mathrm{Si}} - n_{\mathrm{SiO_2}}} \tag{5}$$

и дает величину порядка 70 %. Вместе с тем для заданной толщины напыленной пленки (400 нм) долю мощности можно посчитать точно с помощью прямого численного моделирования распределения моды в среде COMSOL. Проведенный расчет дал величину для доли мощности 94 %, т.е.толщина такой плен-

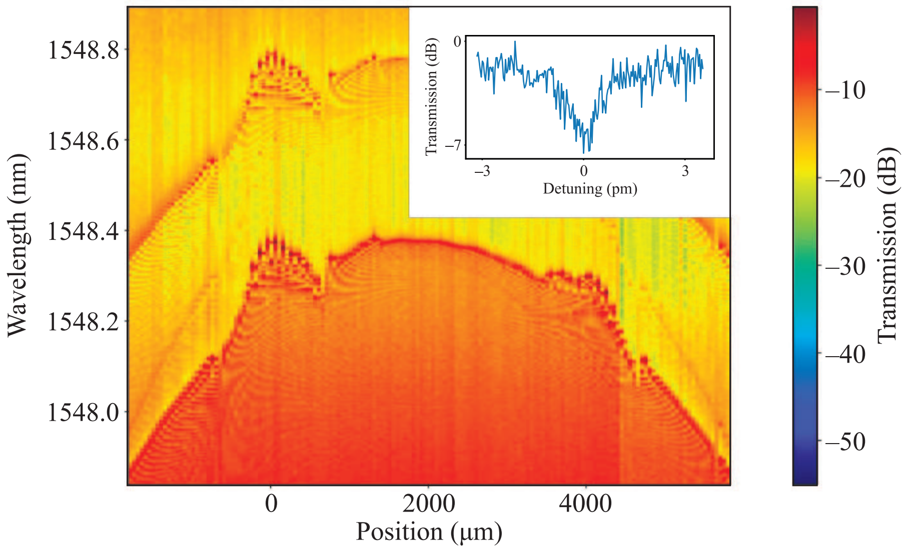

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектрограмма МШГ образца после напыления нитрида кремния. Вставка – спектр пропускания, снятый в высоком разрешении и соответствующий отдельному резонансу

ки должна быть достаточна для полной локализации моды в кремнии, соответственно, и эффективный показатель преломления для такой моды должен быть близок к 3.47.

Расхождение между ожидаемым эффективным показателем преломления и полученным из экспериментальных данных может быть связано с недостаточным качеством напыленного слоя: при напылении либо формируется слой недостаточно плотный и с высокой пористостью, либо более тонкий, чем предполагалось. Это приводит к уменьшению эффективного показателя преломления. Кроме того, наличие больших флуктуаций плотности на поверхности приводит еще и к повышению потерь на рассеяние, что и наблюдается в эксперименте (добротность падает).

В качестве второго нелинейного напыленного материала был использован нитрид кремния. Напыление происходило на отожженное стандартное оптоволокно с предварительно внесенными вариациями радиуса (как и в случае напыления кремния). Добротность до напыления, оцененная по спектру пропускания, составила 10^7. Максимальная добротность микрорезонатора с напыленной оболочкой из нитрида кремния составила 10^6, рис. 3. В спектрограмме МШГ после напыления также наблюдаются различные резонансные сдвиги, связанные с разными радиальными числами мод. В спектрограмме, кроме внесенных вариаций радиуса (контрольных точек), наблюдается неоднородная вариация радиуса от напыления, рис. 3.

Измеренная скорость напыления позволила оценить толщину напыленного слоя в самом толстом месте как 1500 нм. Отношение пороговых мощностей, посчитанных с помощью формулы (3) для образца с внешней оболочкой из оксида кремния (до напыления) и для образца с внешней оболочкой из нитрида кремния (после напыления), составило 15, т.е. в этом случае также не был получен выигрыш в пороговой мощности.

Оценка эффективного показателя преломления по аналогии с предыдущим случаем с использованием формул (4) и (5) позволила оценить его величину как 1.86, долю мощности в слое из нитрида кремния в 74 %. В то же время оценка, выполненная в среде COMSOL, дает долю мощности в 99 % при толщине напыления в 1500 нм. Поэтому мы заключаем, что напыление нитрида кремния также происходит неоднородным по толщине образом, и, вероятно,напыленный слой обладает высокой пористостью или недостаточной толщиной.

Таким образом, в ходе работы были получены микрорезонаторы с внешней оболочкой из напыленных магнетронным методом высоконелинейных материалов: как кремний так и нитрид кремния. Процесс напыления сопровождается внесением неоднородных вариаций эффективного радиуса. Было показано, что максимальные добротности составляют 10^5 в образце с напыленной оболочкой из кремния и 10^6 в образце с напыленной оболочкой из нитрида кремния, что не приводит к уменьшению пороговой мощности наблюдения нелинейных эффектов. Измерения эффективных показателей преломления позволяют заключить, что снижение добротности может быть связано с качеством пленок, имеющих неоднородности в своей структуре. Тем не менее, достигнутое увеличение эффективного показателя преломления приводит к сильной локализации поля моды у поверхности. Это, в свою очередь, делает полученные микрорезонаторы привлекательными в качестве высокочувствительных элементов для детектирования показателя преломления окружающей среды.

Экспериментальные исследования частично выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования "Спектроскопия и оптика" в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

Финансирование работы. Работа Н. А. Макаровой и И. Д. Ватника поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (FSUS-2025-0010). Работа В. С. Терентьева выполнена в рамках госзадания Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук "Разработка элементов и исследование характеристик лазерных и сенсорных систем на основе структурированных волоконных световодов,микрорезонаторов и гибридных схем" (FWNG-2024-0015).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. X. Jin, X. Xu, H. Gao, K. Wang, H. Xia, and L. Yu, Photonics Res. **9**, 171 (2021).
2. M. Sumetsky and Y. Dulashko, Opt. Express **20**, 27896 (2012).
3. M. Sumetsky, Phys. Rev. Lett. **111**, 163901 (2013).
4. M. Sumetsky, Opt. Lett. **39**, 5578 (2014).
5. E. Eadie, S. Deep, and P. Bianucci, Opt. Express **33**, 34677 (2025).
6. V. V. Dvoyrin and M.Sumetsky, Opt. Lett. **41**, 5547 (2016).
7. Y. Song, Y. Hu, M. Loncar, and K. Yang, Light Sci. Appl. **14**, 270 (2025).
8. D. V. Krisanov, A. S. Nesterok, and I. D. Vatnik, IEEE Photonics J. **13**, 1 (2021).
9. A. Y. Kolesnikova and I. D. Vatnik, Phys. Rev. A **108**, 033506 (2023).
10. М. Л. Городецкий, *Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью*, Физматлит, М. (2012).