

ПОЛИРОВАННОЕ ВОЛОКНО КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ СВЯЗИ С МИКРОРЕЗОНАТОРОМ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

© 2024 г. Д. Д. Ружицкая^а, А. К. Воробьев^а, Н. А. Капридов^а,
А. А. Самойленко^б, К. Н. Миньков^{а,*}

^аРоссийский квантовый центр

Россия, 121205, Москва, Большой бульвар, 30, стр. 1

^бВсероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений

Россия, 119361, Москва, Озерная ул., 46

*e-mail: k.minkov@rqc.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023 г.

После доработки 04.07.2023 г.

Принята к публикации 27.07.2023 г.

Предложена методика создания элемента связи для микрорезонатора с модами типа шепчущей галереи на основе полированного оптического волокна, не требующая использования дорогостоящих компонентов и технологий. Продемонстрировано, что предложенный элемент связи обеспечивает эффективность передачи излучения вплоть до 30%, а также позволяет управлять состоянием поляризации излучения на входе в микрорезонатор.

DOI: 10.31857/S0032816224020223 EDN: QRJQDK

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько лет интерес к использованию диэлектрических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи (МШГ) в оптике непрерывно растет. Этот интерес обусловлен уникальными свойствами излучения, которые обеспечивают МШГ, такими как сверхмалая ширина линии излучения, высокая плотность и интенсивность энергии, а также возможность сверхточного детектирования и генерации оптических частотных гребенок [1–3].

Возбуждение мод внутри микрорезонатора осуществляется за счет когерентного спадающего поля, которое обеспечивает передачу излучения от элемента связи к микрорезонатору [4, 5]. По результатам многочисленных экспериментов установлено, что наиболее эффективными элементами связи для кристаллических микрорезонаторов являются преломляющие призмы [6], растянутые волокна [7], полированные под углом волокна [8, 9], планарные волноводы [10] и сошлифованные к сердцевине волокна [11]. Выбор конкретного элемента связи зависит

от ряда факторов: необходимой величины эффективности связи, показателя преломления, дисперсии, геометрии и размеров микрорезонатора, разницы постоянных распространения излучения в элементах связи и моде микрорезонатора, а также взаимном расположении компонентов [4, 12]. Изучение этих параметров является важным направлением исследований, которые помогут оптимизировать доставку света в МШГ и сделать взаимодействие с внешними оптическими элементами более эффективным.

В технических приложениях использование различных типов оптического волокна для связи считается более надежным, чем применение призмы в качестве элемента связи [8, 12, 13]. Это связано с тем, что использование призмы требует введения в систему дополнительных элементов коллимационной оптики, что загромождает установку. Кроме того, при использовании призмленного элемента связи сложно обеспечить выполнение условия фазового синхронизма, необходимого для эффективной связи с модами микрорезонатора [4, 14]. Современные элементы связи на основе планарных волноводов лишены

этих недостатков [4, 10, 15]. Они открывают широкие возможности для интеграции элементов с микрорезонаторами с МШГ в устройства фотоники, являются компактными и простыми в использовании. Однако общий недостаток применения таких волноводных элементов связи — это большие потери излучения, что ограничивает применимость этого вида связи для исследования квантово-оптических эффектов [4, 10].

Элементы связи на основе оптического волокна имеют ряд преимуществ перед всеми другими типами систем связи. Оптоволокно обладает низкими потерями излучения при распространении, компактностью, а также оно позволяет управлять излучением при помощи стандартных компонентов [3–5, 7, 8, 11, 16]. Существует несколько типов элементов связи на основе оптоволокон, которые различаются по эффективности связи и стабильности: сошлифованные до сердцевины волокна, растянутое и полированное под углом оптоволокно. Среди этих элементов связи наименьшее распространение имеет сошлифованное до сердцевины волокно [4, 11, 16]. Такой элемент связи представляет собой оптоволокно с удаленной до сердцевины оболочкой, закрепленное в специальной подложке [4]. Из-за трудоемкости изготовления такого элемента связи он почти полностью замещен растянутыми [7] или полированными под углом волокнами [8, 9]. Наибольшей эффективностью связи обладает растянутое оптическое волокно, при котором достигается эффективность связи 99.95%, она ограничена только поглощением оптоволокон, линия связи при этом не прерывается [4, 5, 16]. Однако такой подход имеет недостатки, связанные с чувствительностью растянутого волокна к внешним условиям, изгибам и физической нагрузке [16], а также со сложностью в изготовлении и необходимостью использовать специальное оборудование для его изготовления [17].

Полированные под углом волокна, которые представляют собой гибриды призмы и волновода, являются более стабильными и компактными, чем растянутые волокна, они обеспечивают низкие потери при передаче сигнала (до 6 дБ на длине волны 1.55 мкм) и высокую стабильность связи [8, 9]. Они также обладают низким уровнем фазовых шумов и высокой температурной стабильностью [18, 19]. При использовании волокна с сохранением поляризации такие

элементы связи позволяют точно настраивать поляризацию оптического излучения, что является полезным свойством в коммерческих оптических устройствах. Комбинация этих качеств в сочетании с простотой изготовления и применения делает такой вид связи привлекательным в приложениях высокопроизводительных систем связи и радиолокации, метрологии, спектроскопии, а также при исследовании квантово-оптических и нелинейных эффектов.

В данной статье представлен новый простой способ изготовления полированного волокна, который позволяет упростить конструкции устройств и изготавливать элементы связи в производственных условиях без использования дополнительных дорогостоящих компонентов. Оценена эффективность связи полированного волокна и микрорезонатора с МШГ. Важным результатом является впервые продемонстрированная возможность управлять состоянием поляризации лазерного излучения перед его вводом в микрорезонатор с МШГ, что может быть полезным для различных областей фотоники, включая высокоточные сенсорные устройства и метрологию.

2. МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИРОВАННОГО ВОЛОКНА

Для изготовления полированного волокна применялся адаптированный метод полировки с помощью абразивных листов. Ниже приведено подробное описание установки и этапов изготовления полированного под углом волокна.

2.1. Подготовка оптического волокна

Для изготовления полированного волокна в работе используется стандартное одномодовое волокно SMF-28 с диаметром оболочки 125 мкм и диаметром сердцевины 9 мкм, покрытое полимерной оболочкой и работающее на длине волны 1550 нм. Сначала патч-корд разрезается на две половины, каждая из которых становится заготовкой для элемента связи. Затем конец волокна очищается от полимерной оболочки на определенную длину и устанавливается в специальный корпус. В качестве корпуса элемента связи используется полый стержень из медицинской иглы со спиленным острием. Волокно устанавливается в корпус-держатель и зачищается до кварцевой отражающей оболочки на длину,

позволяющую оставить 1–1.5 см с учетом допуска на скалывание торца. После этого торец волокна скалывается, а оставшийся конец заготовки подключается к источнику излучения для проверки выходящего из торца волокна излучения. В результате должен получаться плоскопараллельный пучок света.

2.2. Установка для полировки оптического волокна

Приспособление для полировки оптоволоконно показано на рис. 1. Оно представляет собой коромысло, собранное из стандартных деталей и следующих специальных элементов:

- опора 2 – клиновидный элемент, который может быть установлен на любой ровной поверхности, она служит точкой опоры для вращающегося коромысла,
- ось 3 – ответная деталь опоры, имеющая торец с канавкой для удержания верхней кромки опоры, а также отверстие, к которому крепятся подвижные части коромысла,
- держатель волокна 6 – пластинка с отверстием для крепления к коромыслу, одна из граней держателя имеет срез, угол которого соответствует углу полировки оптоволоконного Φ . В представленной работе этот угол определяется условием согласования фаз, его величина обеспечивает максимальную эффективность связи с МШГ [8]:

$$\Phi = \arcsin(n_{\text{res}} / n_{\text{fiber}}) = 73.4^\circ,$$

где $n_{\text{res}} = 1.41$ – показатель преломления микро-резонатора из фторида магния, $n_{\text{fiber}} = 1.47$ – показатель преломления оптоволоконного.

Представленное на рис. 1 коромысло имеет два устойчивых положения: противовес 1 опущен на стол, держатель волокна 6 опущен на стол. Для достижения этих положений проводится балансировка противовеса таким образом, чтобы сила прижима оптического волокна к столу была минимальной.

Процесс полировки начинается с зачистки конца волокна и его пропускания через направляющую трубку 5, как показано на рис. 1. Затем зачищенный конец волокна приклеивается к подготовленной на держателе из алюминиевого скотча клейкой поверхности 7, как показано на рис. 2. Далее зачищенная часть волокна

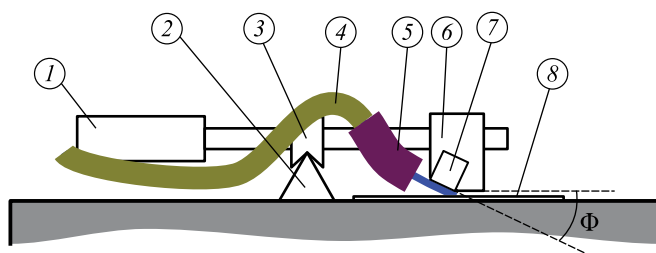


Рис. 1. Приспособление для изготовления полированного волокна: 1 – противовес, 2 – опора, 3 – ось, 4 – оптическое волокно, 5 – направляющая трубка, 6 – держатель оптического волокна, 7 – алюминиевая подложка, 8 – абразивный лист, Φ – угол полировки.

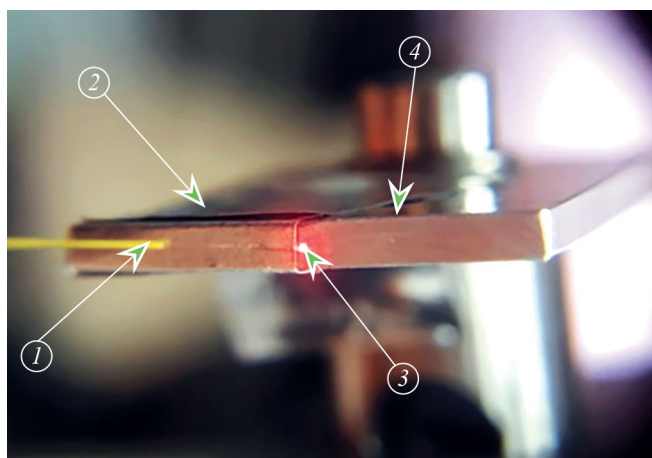


Рис. 2. Закрепление и проверка оптического волокна в держателе для полировки: 1 – оптическое волокно, 2 – подготовленная липкая поверхность на держателе 4, 3 – выходящее для проверки излучение.

вдавливается в липкую поверхность при помощи мягкого манипулятора, например бамбуковой палочки, таким образом чтобы держатель волокна касался поверхности стола только волокном, как показано на рис. 2.

2.3. Шлифовка волокна

На этом этапе работы необходимо установить на ровную, бездефектную поверхность лист абразива 8 с самым грубым зернистым покрытием – 3 мкм. На этот лист наносится капля чистой воды, а затем на смоченный участок опускается держатель с закрепленным волокном. Затем необходимо равномерно перемещать лист абразива по столу круговыми движениями или восьмеркой, следя при этом за тем, чтобы коромысло не колебалось и чтобы не было зацепов или залипаний. Если такие несоответствия наблюдаются, необходимо снизить скорость движений. Если это не помогает, полировку следует

остановить и проверить состояние волокна с помощью микроскопа.

После выполнения нескольких десятков движений необходимо поднять коромысло, промокнуть конец волокна сухой салфеткой и осмотреть волокно при помощи оптического микроскопа. Критерием окончания процесса полировки является то, что излучение начинает выходить под небольшим углом к держателю, а не вдоль оси волокна.

2.4. Полировка волокна

После достижения указанного в предыдущем пункте условия проводится полировка волокна на последовательно более тонких абразивах с зернистостью 1 мкм и 0.2 мкм несколькими десятками движений, аналогичных процессу шлифовки. Критерием окончания процесса полировки является угол, под которым выходит пучок излучения (пучок должен быть направлен под углом к оси волокна). Затем волокно снимается с держателя и очищается.

После окончания полировки на волокно наносится капля эпоксидной смолы для его закрепления в корпусе-держателе на расстоянии приблизительно 1 см от торца. На этот участок надвигается полый стержень, в который было вставлено волокно. Излишки смолы удаляются мягким манипулятором, чтобы не повредить волокно. После этого проводится очистка изготовленного элемента связи с использованием изопропилового спирта для удаления загрязнений, рассеивающих излучение. Изготовленное волокно показано на рис. 3.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ

Для оценки эффективности применения изготовленного элемента связи было проведено исследование характеристик высокодобротного микрорезонатора, изготовленного из фторида магния — добротности и эффективности связи [4]. Для этого была использована установка на рис. 4.

В качестве источника излучения в установке (рис. 4) использовались два источника излучения 1: первый (тестовый) лазер видимого диапазона с рабочей длиной волны 650 нм для подвода элемента связи к микрорезонатору, этот источник использовался для визуализации излучения

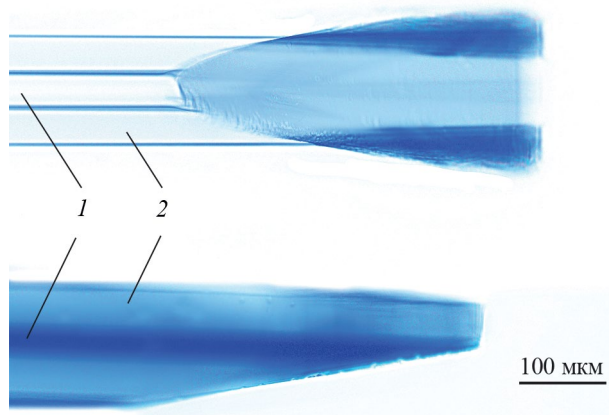


Рис. 3. Изготовленное волокно под микроскопом Nikon Eclipse LV150N с 20-кратным увеличением: 1 — сердцевина оптического волокна, 2 — кварцевая оболочка.

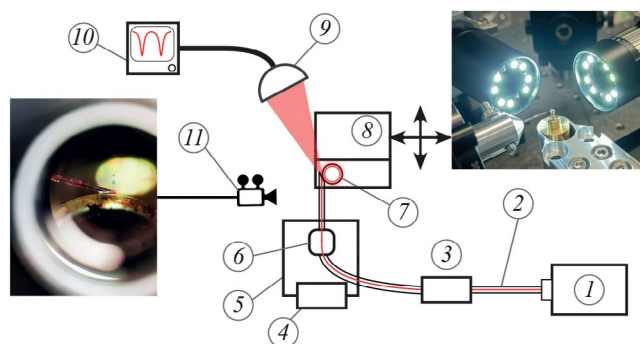


Рис. 4. Схема измерения добротности: 1 — источник излучения, 2 — изготовленное полированное волокно, 3 — контроллер поляризации, 4 — пьезоподача, 5 — подача для точного подведения, 6 — гониометр с держателем для оптического волокна, 7 — микрорезонатор из фторида кальция, 8 — подача для грубого подведения, 9 — пространственный фотодетектор, 10 — осциллограф, 11 — система наблюдения, включающая в себе две камеры. Красные линии указывают оптический путь излучения от источника, на вставке слева показано увеличенное изображение контакта волокна и микрорезонатора, справа — фотография установки.

на поверхности микрорезонатора и упрощения процесса юстировки и второй — диод с распределенной обратной связью для измерения добротности с рабочей длиной волны 1546 нм, он являлся источником излучения рабочей длины волны устройства и использовался для измерения добротности. Микрорезонатор 7 с МШГ диаметром 5 мм с радиусом кривизны 0.5 мм, изготовленный из фторида магния методом алмазного точения с последующей полировкой абразивными суспензиями [20], устанавливался при помощи зажима в подачу NanoMax 313D Thorlabs 8, позволяющую регулировать его положение

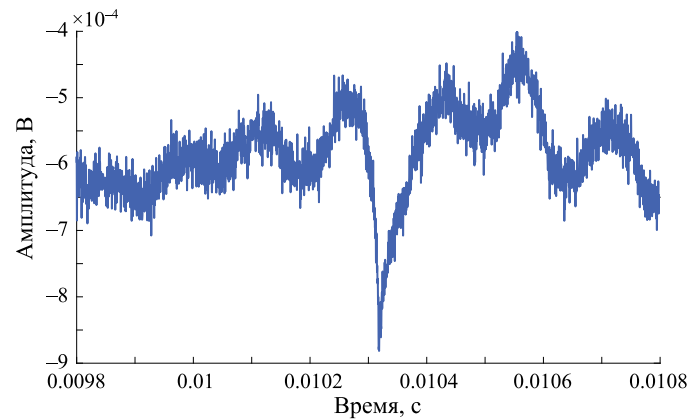


Рис. 5. Измеренная временная зависимость амплитуды сигнала мод микрорезонатора на фотодетекторе. Резонансный провал свидетельствует о возбуждении моды в микрорезонаторе.

по трем координатам, включая настройку по высоте, с точностью 1 мкм. Изготовленное полированное волокно 2, подключенное к источнику накачки 1 и проходящее через контроллер поляризации General Photonics PLC-003-S-90 3, ставилось в гониометр 7R7 Standa 6, расположенный на пьезоподаче NFL5DP20/M Thorlabs 5, позволявшей регулировать зазор между резонатором и элементом связи с точностью 0.05 мкм и управлявшейся пьезоэлементом 4. Визуальный контроль места контакта элемента связи с резонатором осуществлялся при помощи системы из двух камер 11, сфокусированных на точку контакта резонатора и элемента связи, расположенных в перпендикулярных плоскостях.

Для возбуждения мод внутри микрорезонатора было необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- отрегулировать высоту элементов таким образом, чтобы изображение полированного волокна и середина образующей микрорезонатора совпадали,
- вывести полированное волокно на 100–300 мкм по касательной к образующей микрорезонатора при помощи грубой подачи 8,
- завести видимое излучение от тестового лазера в полированное волокно, при этом необходимо было проконтролировать получение двух бликов на торце и подвести менее яркий из них к микрорезонатору при помощи точной подачи 5,
- переключить источник излучения на диод с длиной волны 1546 нм и сфокусировать выходящее из микрорезонатора излучение

на чувствительную часть фотодетектора PDA50B-EC Thorlabs 9 с полосой пропускания 500 кГц, подключенного к осциллографу Keysight DSOX3024T 10.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемый в работе микрорезонатор изготовлен из фторида магния методом алмазного точения с последующей полировкой абразивными суспензиями [20]. Диаметр микрорезонатора составлял 5 мм, что соответствует области свободной дисперсии 28 ГГц. Путем установления поляризации входящего в микрорезонатор излучения был достигнут максимальный уровень связи, составляющий 30%. Подбор поляризации осуществлялся при помощи визуального контроля контраста мод на осциллографе. На рис. 5 показана измеренная зависимость амплитуды сигнала на фотодетекторе от времени. Добротность изготовленного микрорезонатора определялась методом измерения полуширины резонансного провала мощности на полувысоте [4] и для критической связи превышала 10^{10} .

Возможность контролировать поляризацию вводимого в микрорезонатор излучения востребована во множестве приложений. Например, в создании оптических часов на основе микрорезонаторов с МШГ требуется контроль поляризации для достижения максимальной точности измерений [21]. В лазерах на основе микрорезонаторов с МШГ контроль поляризации позволяет достигнуть существенного уменьшения фазовых шумов и повышения когерентности излучения [22], в магнитометрии контроль

поляризации используется для измерения магнитного поля [23], а в области квантовых вычислений контроль состояния поляризации на входе нужен при создании стабильных и долговременных квантовых состояний [24].

Поэтому в дальнейшем предлагается несколько способов для увеличения полученного уровня связи.

1) Использование микрорезонатора меньшего размера. Уменьшение образующей микрорезонатора позволит оптимизировать коэффициент связи между элементами связи и микрорезонатором с МШГ. Предварительный теоретический анализ показывает, что при радиусе образующей резонатора порядка 7 мкм мода резонатора будет оптимально согласована с модой излучения, выходящего из элемента связи.

2) Использование специального элемента на торцах полированного волокна. В качестве такого элемента может быть использована брэгговская решетка на торце волокна. Брэгговские решетки представляют собой периодические изменения показателя преломления вдоль волокна. Они могут быть настроены на определенную длину волны, чтобы увеличить эффективность связи с микрорезонатором.

3) Введение дополнительного светопроводящего элемента на полированной поверхности волокна. Таким элементом может быть, например, волоконная линза. Однако такие элементы приведут к усложнению установки и ее удорожанию.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы был разработан простой и экономичный способ создания элемента связи для микрорезонатора с модами шепчущей галереи на основе полированного волокна. Эффективность связи достигла 30%, что позволяет использовать данный элемент связи для работы с микрорезонаторами с гигантской добротностью. Кроме того, предложенный дизайн элемента связи позволяет контролировать состояние поляризации излучения перед его вводом в микрорезонатор. Результаты работы могут быть полезны при проектировании и миниатюризации устройств и систем на основе микрорезонаторов с модами шепчущей галереи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ВНИИОФИ (срк.vniiofi.ru) и ЦКП «Визуализации высокого разрешения» Сколтеха (www.skoltech.ru). Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Российского квантового центра О. В. Боровковой за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 21-72-00132).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S.* // Phys. Lett. 1989. V. 137. P. 393.
[https://doi.org/10.1016/0375-9601\(89\)90912-2](https://doi.org/10.1016/0375-9601(89)90912-2)
2. *Raja A.S., Voloshin A.S., Guo H., Agafonova S.E., Liu J., Gorodnitskiy A.S., Karpov M., Pavlov N.G., Lucas E., Galiev R.R., Shitikov A.E., Jost J.D., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J.* // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 680.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08498-2>
3. *Zheng Y., Wu Z., Shum P.P., Xu Z., Keiser G., Humbert G., Zhang H., Zeng S., Dinh X.Q.* // Opto-Electron. 2018. V. 1. P. 180015.
<https://doi.org/10.29026/oea.2018.180015>
4. *Городецкий М.В.* Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. Москва: Физматлит, 2011.
5. *Righini G.C., Dumeige Y., Féron P., Ferrari M., Nunzi Conti G., Ristic D., Soria S.* // Riv. Nuovo Cim. 2011. №. 8. P. 435.
<https://doi.org/10.1393/ncr/i2011-10067-2>
6. *Demchenko Yu.A., Bilenko I.A., Gorodetsky M.L.* // Quantum. Electron. 2017. V. 47. P. 743.
<https://doi.org/10.1070/QEL16371>
7. *Knight J.C., Cheung G., Jacques F., Birks T.A.* // Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 1129.
<https://doi.org/10.1364/OL.22.001129>
8. *Ilchenko V.S., Yao X.S., Maleki L.* // Opt. Lett. 1999. V. 24. P. 723.
<https://doi.org/10.1364/OL.24.000723>
9. *Grudin I.S., Yu N., Maleki L.* // Opt. Lett. 2009. V. 34. P. 878.
<https://doi.org/10.1364/OL.34.000878>
10. *Little B.E., Laine J.-P., Lim D.R., Haus H.A., Kimerling L.C., Chu S.T.* // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 73.
<https://doi.org/10.1364/OL.25.000073>

11. Dubreuil N., Knight J.C., Leventhal D.K., Sandozghdar V., Hare J., Lefèvre V. // Opt. Lett. 1995. V. 20. P. 813.
<https://doi.org/10.1364/OL.20.000813>
12. Little B.E., Laine J.-P., Haus H.A., Light J. // J. Lightwave Tech. 1999. V. 17. P. 704.
<https://doi.org/10.1109/50.754802>
13. Lissillour F., Messenger D., Stéphan G., Féron P. // Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 1051.
<https://doi.org/10.1364/OL.26.001051>
14. Ishikawa H., Tamaru H., Miyano K. // J. Opt. Soc. 2000. V. 17. P. 802.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.17.000802>
15. Laine J.-P., Little B.E., Lim D.R., Tapalian H.C., Kimerling L.C., Haus H.A. // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 1636.
<https://doi.org/10.1364/OL.25.001636>
16. Su J. // Sensors. 2017. V. 17. P. 540.
<https://doi.org/10.3390/s17030540>
17. Иванов А.Д., Миньков К.Н., Самойленко А.А. // Оптический журнал. 2017. Т. 84. С. 86.
<https://doi.org/10.1364/JOT.84.000500>
18. Savchenkov A.A., Matsko A.B., Ilchenko V.S., Maleki L. // Opt. Exp. 2007. V. 15. P. 6768.
<https://doi.org/10.1364/OE.15.006768>
19. Baumgartel L., Thompson R., Strekalov D., Grudinin I., Yu N. // Joint Conf. IEEE IFC & European FCS, Proceed. SF. CA. 2011. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/FCS.2011.5977867>
20. Миньков К.Н., Лихачев Г.В., Павлов Н.Г., Данилин А.Н., Шитников А.Е., Юрин А.И., Лоншаков Е.А., Булыгин Ф.Д., Лобанов В.Е., Биленко И.А. // Оптический журнал. 2021. Т. 86. С. 84.
<https://doi.org/10.1364/JOT.88.000348>
21. Sherman J.A., Lemke N.D., Hinkley N., Pizzocaro M., Fox R.W., Ludlow A.D., Oates C.W. // Phys. Rev. 2012. V. 108. P. 153002.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.153002>
22. Wang B., Morgan J.S., Sun K., Jahanbozorgi M., Yang Z., Woodson M., Estrella S., Beling A., Yi X. // Sci. Appl. 2021. V. 10. № 4.
<https://doi.org/10.1038/s41377-020-00445-x>
23. Yacoby E., Meshorer Y., London Y. // Opt. Laser Technol. 2022. V. 151. P. 108019.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108019>
24. He L.Y., Wang T.-J., Wang C. // Opt. Exp. 2016. V. 24. P. 15429.
<https://doi.org/10.1364/OE.24.015429>