

Особенности изготовления микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи из аморфных материалов

© Т.С. Тебенева¹, А.Е. Шитиков¹, О.В. Бендеров², В.Е. Лобанов¹, А.В. Родин², И.А. Биленко^{1,3}

¹ Российский квантовый центр, 121205 Москва, Россия

² Московский физико-технический институт,
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
119991 Москва, Россия

e-mail: tetasia19@gmail.ru

Поступила в редакцию 16.02.2024 г.

В окончательной редакции 21.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

Описана методика изготовления высокодобротных микросферических резонаторов из сульфида мышьяка и фторидного стекла (ZBLAN) методом плавления оптических волокон, рассмотрены различные дефекты, возникающие в процессе изготовления, и предлагаются способы для их устранения. Показано, что разработанная методика позволяет достичь уровня добротности микрорезонаторов, ограниченного фундаментальными оптическими потерями в используемых материалах.

Ключевые слова: микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи, изготовление, фторидное волокно, халькогенидное волокно, измерение добротности.

DOI: 10.61011/OS.2024.03.58155.6043-23

Введение

Оптические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ) привлекают особое внимание благодаря сочетанию малых геометрических размеров и малых оптических потерь в широком спектральном диапазоне [1–3]. Высокодобротные МШГ-микрорезонаторы представляют огромный интерес для задач спектроскопии [4,5], оптических сенсоров [6,7], для наблюдения и исследования различных нелинейных эффектов [8–10], а также для создания новых лазерных источников [11–13] и стабилизации лазерного излучения [14–16]. МШГ-микрорезонаторы открывают огромные перспективы для развития фотонных компонентов для задач биосенсинга [6,17], прецизионных спектроскопических измерений и мониторинга различных газов [4,18], а также для создания стабильных источников излучения [19,20] в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне. Из-за наличия фундаментальных полос поглощения большинства молекул этот диапазон представляет особый интерес для аналитической спектроскопии. На сегодняшний день в этом диапазоне наблюдается острый дефицит источников излучения с узкой и стабильной линией генерации, что является сдерживающим фактором для развития фотоники среднего ИК. Одним из путей решения этой проблемы является создание оптических компонентов на основе МШГ-микрорезонаторов, обладающих высокой добротностью в этом диапазоне. В первую очередь основной задачей для развития фотоники в среднем ИК является поиск подходящих материалов, обладающих низкими оптическими потерями в диапазоне от

2 μm . В зависимости от задач и области применения для изготовления МШГ-микрорезонаторов используются различные кристаллические и аморфные материалы (кремний [21,22], германий [23–26], фториды [27–31], халькогениды [32,33], теллуриды [34,35] и др.).

Изготовление МШГ-микрорезонаторов с высокой добротностью накладывает определенные требования на качество поверхности резонаторов, поэтому для кристаллических резонаторов требуется дополнительная механическая полировка поверхности с целью минимизации потерь, связанных с шероховатостями [36–38]. Для аморфных материалов основным методом изготовления является метод плавления, при котором стекло нагревают до температуры выше температуры стеклования и под действием сил поверхностного натяжения оно приобретает сферическую форму [1,39]. Механическая полировка поверхности в этом случае не требуется, что является преимуществом перед кристаллическими резонаторами. Для изготовления резонаторов с минимальной поверхностной шероховатостью из аморфных материалов необходимо подобрать оптимальные условия в процессе изготовления, учитывая химико-физические свойства используемых стекол. Для изготовления МШГ-микросфер методом плавления важной задачей является выбор нагревательного элемента. В работах [40,41] был представлен способ изготовления, где в качестве нагревательного элемента использовался поток горячего инертного газа в вертикальной трубке. Такой способ позволяет предотвратить окисление. Стекло измельчают в порошок с размерами частиц до 200 μm и помещают в трубку. Поднимаясь за счет потока газа и нагреваясь

до необходимой температуры, частицы оплавляются и приобретают сферическую форму. Другой вариант был представлен в работе [42], где также измельченное в порошок стекло помещают в разогретое до температуры стеклования высокочистое масло с большой температурой кипения (более высокой, чем температура плавления используемого стекла) и большим коэффициентом теплопроводности. Особенностью описанных вариантов изготовления является возможность массового изготовления аморфных резонаторов с размерами до $200\ \mu\text{m}$, однако в обоих вариантах требуется сложная экспериментальная установка и не тривиальные технологические процедуры крепления и очистки поверхности резонаторов.

Для изготовления аморфных МШГ-микрорезонаторов широко применяется CO_2 -лазер. Стоит отметить, что возможности использования данного способа изготовления МШГ-микрорезонаторов практически неиссякаемы, так как позволяют изготавливать микрорезонаторы практически любой формы и с высокой точностью. Например, излучение CO_2 -лазера успешно используется для изготовления веретенообразных микрорезонаторов на основе оптических волокон [43,44]. Также CO_2 -лазер может эффективно использоваться для изготовления микрорезонаторов на стержнях, например из плавленого кварца [45,46]. Стоит также отметить целый класс веретенообразных МШГ микрорезонаторов, описываемых в литературе в качестве основных элементов для поверхностной аксиальной фотоники нанометровых размеров (SNAP) [48]. Такие микрорезонаторы изготавливаются на поверхности оптического волокна методом модуляции эффективного радиуса оптического волокна с суб-ангстремной точностью [47–49]. Особенностью такого метода является возможность изготовления большого количества связанных МШГ-микрорезонаторов с высокой точностью и заданными спектральными характеристиками, что открывает колоссальные возможности для исследования нелинейных эффектов [50]. Однако такой метод изготовления также требует высокотехнологичной экспериментальной установки.

Излучение CO_2 -лазера также эффективно применяется для изготовления микроторOIDов [51,52]. В работе [53] было показано, что использование высокоэнергетического сфокусированного лазерного пучка CO_2 -лазера позволяет успешно совмещать объемные и интегральные технологии изготовления оптических элементов на чипах. Недостатком этого метода является испарение материала с поверхности с последующим осаждением паров на заготовку, что ухудшает качество поверхности. Наиболее простые и доступные варианты метода плавления могут быть реализованы с использованием электрических нагревателей [54,55].

Перспективными для массового производства, но в то же время пока малоиспользуемыми материалами для создания высокодобротных микрорезонаторов для среднего ИК диапазона являются сульфид мышьяка (As_2S_3) и стекло на основе фторидов тяжелых металлов ZBLAN

(ZBLAN — группа стекол состава $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ [56]). Их преимуществами являются, во-первых, доступность в виде представленных на рынке оптических волокон, а во-вторых, необходимые оптические параметры в среднем ИК. Сульфид мышьяка прозрачен в диапазоне до $\sim 11\ \mu\text{m}$, имеет большой показатель преломления ($n \approx 2.4$ на длине волны $2\ \mu\text{m}$) и большой нелинейный показатель преломления ($2 \cdot 10^{-18}\ \text{m}^2/\text{W}$) [57,58]. Благодаря большому коэффициенту нелинейности такие микрорезонаторы могут использоваться для реализации в них нелинейных эффектов [33,35,52]. Волокно ZBLAN прозрачно в диапазоне до $\sim 4.5\ \mu\text{m}$, имеет показатель преломления $n \approx 1.5$ в диапазоне длин волн от 1.5 до $2.7\ \mu\text{m}$ [59] и относительно небольшой коэффициент нелинейности ($\sim 1.2 \cdot 10^{-20}\ \text{m}^2/\text{W}$ [60]). ZBLAN подходит для легирования различными редкоземельными элементами и может применяться для разработки высокоэффективных компактных лазеров и оптических усилителей [11,61].

В настоящей работе предложен и реализован способ изготовления высокодобротных микрорезонаторов из стекол с относительно низкой (до 500°C) температурой стеклования методом плавления. Для резонаторов из сульфида мышьяка и фторидного стекла ZBLAN найдены оптимальные температурные режимы, исследованы причины возникновения поверхностных дефектов, найдены способы их предотвращения. Измерена добротность МШГ на длине волны $1.55\ \mu\text{m}$, близкая к величине, определяемой фундаментальными потерями в этих материалах. Описанный способ позволяет быстро и с хорошей повторяемостью получать микросферы из вышеупомянутых материалов с малыми потерями и заданного размера, что открывает возможность создания устройств на основе микросфер, в частности для оптических сенсоров и микролазеров.

Метод изготовления микросферических резонаторов

Температура стеклования и плавления большинства халькогенидных и фторидных стекол, варьируется в пределах $200\text{--}500^\circ\text{C}$, поэтому основным методом изготовления микросферических МШГ-резонаторов из таких стекол является метод плавления. Относительно низкая температура плавления в некоторой степени облегчает выбор подходящего нагревательного элемента. В настоящей работе в качестве нагревательных элементов использовались электрический нагреватель паяльной станции для халькогенидных стекол на основе сульфида мышьяка и самодельный спиральный нагревательный элемент из нихромовой проволоки для фторидного стекла. На рис. 1 схематически представлен общий принцип изготовления микросфер. Весь процесс изготовления можно разделить на три основных этапа: предварительную подготовку волокна, процесс плавления и контроль качества поверхности. Этапы подготовки

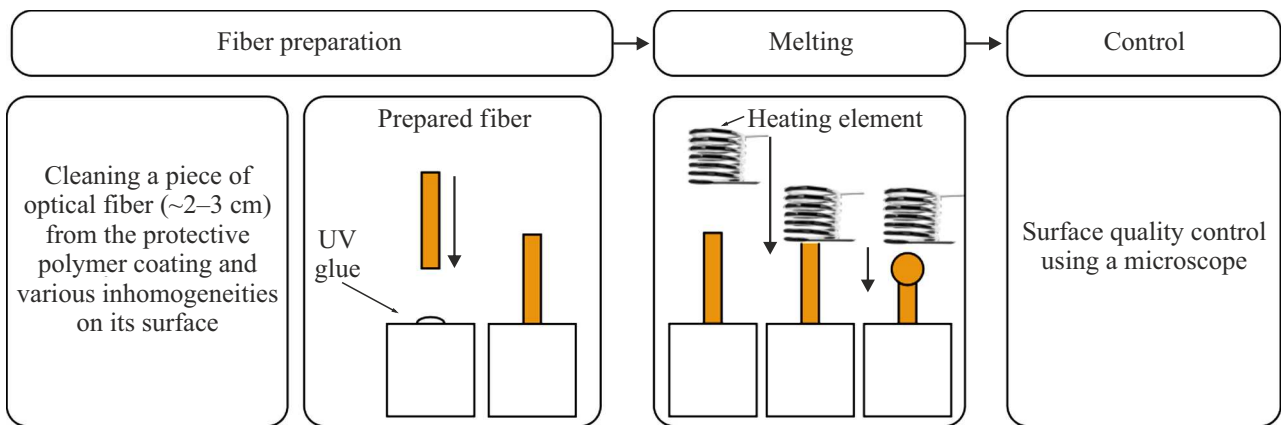


Рис. 1. Схема изготовления аморфных резонаторов из оптического волокна.

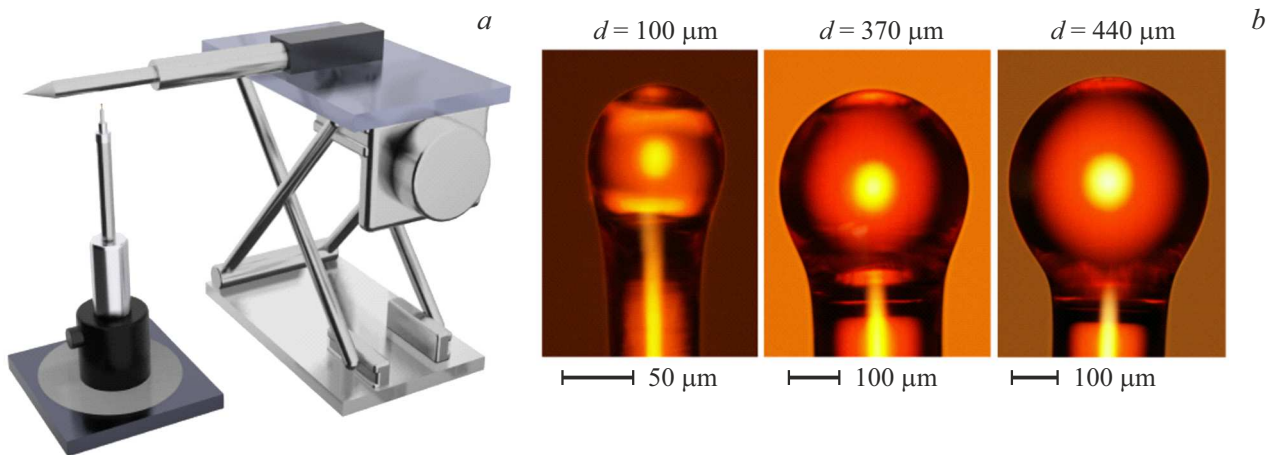


Рис. 2. (а) Схема экспериментальной установки для изготовления микрорезонаторов из сульфида мышьяка. В качестве нагревательного элемента используется жало паяльника, закрепленное на подвижках для перемещения по высоте и точной центровки относительно сферы. (б) Фото готовых микросфер из сульфида мышьяка диаметрами 100, 370 и 440 μm .

волокон и контроль качества поверхности готовых микросфер одинаковы для обоих материалов. При подготовке волокна необходимо удалить защитное полимерное покрытие с помощью ацетона с кусочка волокна длиной 2–3 см и с помощью безворсовых салфеток очистить поверхность волокна от возможных остатков защитной оболочки и других загрязнений изопропиловым спиртом. Очищенное волокно закрепляется в феруле волоконного коннектора при помощи универсального УФ отверждаемого клея так, чтобы 1–1.5 см волокна выходило из ферулы. После ферулы с волокном размещается под нагревательным элементом в экспериментальной установке. Нагревательный элемент опускается к волоконной заготовке на определенное расстояние и по достижении необходимой для плавления температуры верхняя часть волокна начинает оплаиваться, приобретая сферическую форму. Во время плавления волокно сокращается по длине и отдаляется от нагревательного элемента. Процесс формирования сферы контролируется с помощью микроскопа. По достижении желаемого диаметра сферы

нагревательный элемент отводится от волокна и начинается процесс охлаждения. После остывания поверхность микросферы осматривается с помощью микроскопа с большим увеличением для определения качества ее поверхности.

В качестве материала для изготовления микросфер использовались коммерческие одномодовые (6/125 μm) и многомодовые (12/250 μm) волокна из сульфида мышьяка (As_2S_3), изготовленные в ИХВВ РАН, и одномодовые (9/125 μm) волокна на основе фторидов тяжелых металлов ZBLAN (состава $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) от компании Thorlabs. Температура стеклования $\text{As}_2\text{S}_3 \sim 190^\circ\text{C}$ [57], ZBLAN $\sim 265^\circ\text{C}$ [62].

Микрорезонаторы из сульфида мышьяка

На рис. 2, а представлена экспериментальная установка для изготовления микросфер из As_2S_3 , где в

качестве нагревательного элемента использовалась паяльная станция Lukey 852D+. При рабочей температуре нагревателя в 230°C медное жало паяльника с помощью прецизионной подачи опускается к волокну на расстояние примерно $300\ \mu\text{m}$. Во время плавления и формирования сферы длина волокна уменьшается, поэтому для увеличения диаметра микросферы необходимо плавно опускать нагревательный элемент. Конечный диаметр контролируется в процессе плавления с использованием микроскопа. Данная установка позволяет получать микросферы диаметрами от 50 до $500\ \mu\text{m}$.

Для получения микросфер с диаметрами более $250\ \mu\text{m}$ использовалось многомодовое As_2S_3 -волокно, для изготовления микросфер диаметрами от 150 до $250\ \mu\text{m}$ использовалось одномодовое As_2S_3 -волокно.

Вытяжка волокна

Для получения микросфер диаметром менее $150\ \mu\text{m}$ необходимо предварительно растянуть одномодовое волокно до достижения толщины, на $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ меньшей конечного диаметра желаемой сферы. Для растяжения волокна из сульфида мышьяка также использовался метод плавления, который включает в себя нагревание до температуры немного выше температуры стеклования волокна и одновременное растягивание волокна в противоположные стороны. На рис. 3, *a* и *b* представлено фото и схема установки для вытяжки. Для растяжения необходимо также предварительно очистить участок волокна длиной $\sim 5\text{--}6\ \text{cm}$ от полимерной оболочки и очистить поверхность спиртом. Затем подготовленная заготовка закрепляется на двух моторизованных подвижках с помощью волоконных держателей, а очищенный участок волокна размещается внутри нагревательного элемента. В качестве нагревательного элемента используется разъемный медный цилиндр длиной $1\ \text{cm}$ с внешним диаметром $2\ \text{cm}$ и отверстием диаметром $6\ \text{mm}$ для получения равномерного распределения температуры во внутренней полости. Температура поддерживалась на постоянном уровне $\sim 305^{\circ}\text{C}$ в центре цилиндра.

Нагревательный элемент, размещенный на моторизованной подаче, совершает колебательное движение вдоль волокна с амплитудой $5\ \text{mm}$ и скоростью $15\ \mu\text{m/s}$, в то время как концы волокон, также закрепленные на моторизованных подачах, разъезжаются в противоположные стороны со скоростью $10\ \mu\text{m/s}$. Профиль и толщина вытянутого волокна контролируются с помощью микроскопа. После получения необходимой толщины волокна питание на нагревателе выключается, моторизованные подачи с волокном останавливаются, а нагревательный элемент продолжает совершать колебательное движение вдоль волокна до полного остывания нагревательного элемента. На рис. 3, *c* приведены фото до и после вытягивания одномодового волокна толщиной $125\ \mu\text{m}$ с толщиной $20\ \mu\text{m}$. После остывания нагревательного элемента вытянутое волокно в самом

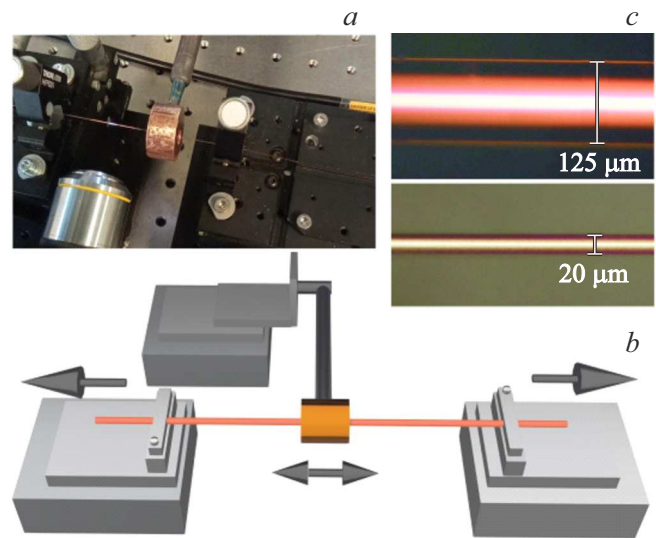


Рис. 3. (a) Фото нагревательного элемента с волокном. (b) Схема экспериментальной установки для растяжения волокна из сульфида мышьяка. (c) Фото волокон до и после растяжения.

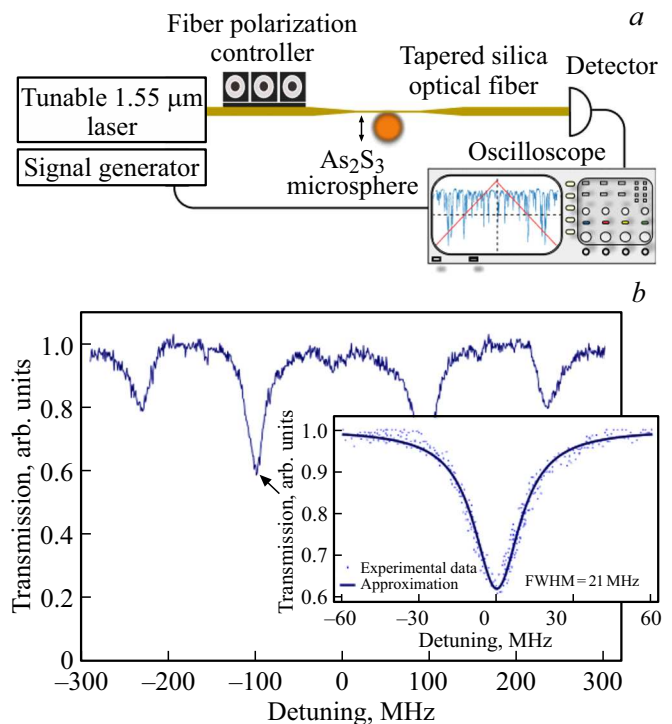


Рис. 4. (a) Экспериментальная установка для возбуждения МШГ. (b) Спектр пропускания для микросферы диаметром $200\ \mu\text{m}$. Во вложении представлена резонансная кривая, аппроксимированная функцией Лоренца с шириной, равной $24\ \text{MHz}$, что соответствует нагруженной добротности $Q = 5.1 \cdot 10^6$.

тонком месте разделяется на две части, каждая из которых может использоваться для изготовления микросфер.

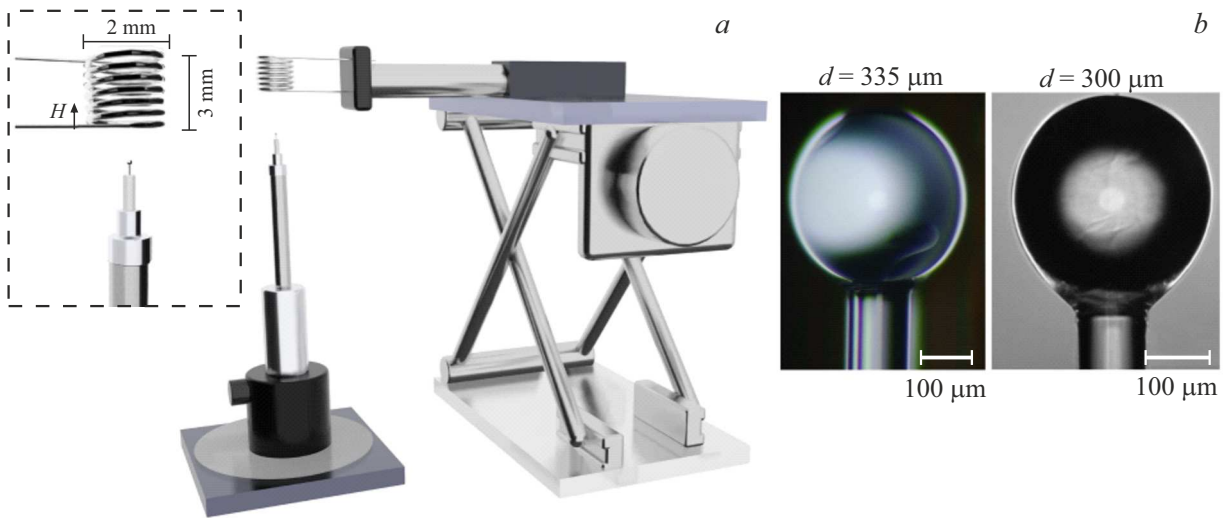


Рис. 5. (а) Схема экспериментальной установки для изготовления микрорезонаторов из фторидного ZBLAN. В качестве нагревательного элемента используется спираль из нихромовой проволоки. (б) Фото готовых микросфер диаметрами 300 и 335 μm .

В результате были получены микросферические резонаторы из сульфида мышьяка диаметрами от 50 до 500 μm . На рис. 2, б представлены полученные микросферы диаметрами 100, 370 и 440 μm . Для оценки качества микросфер необходимо оценить добротность изготовленных резонаторов. Для этого использовалась следующая экспериментальная установка, представленная на рис. 4, а. Для возбуждения мод шепчущей галереи использовался перестраиваемый диодный лазер сbb длиной волны излучения 1.55 μm . Для изменения состояния поляризации лазерного излучения использовался контроллер поляризации. В качестве элемента связи использовалось растянутое кварцевое волокно толщиной в зоне перетяжки до $\sim 1 \mu\text{m}$. Растянутое волокно также использовалось для вывода излучения на фотодетектор. Микросфера размещалась на прецизионной подвижке с пьезоконтроллером. Для расчета добротности была измерена ширина на полувысоте (FWHM) резонансной кривой на спектре пропускания. Для калибровки частоты использовался интерферометр Маха-Цендера с областью свободной дисперсии 102 МГц. Данный элемент связи за счет сил статического электричества подвержен залипанию на резонатор, поэтому он не дает возможности оценить добротность в режиме критической связи, где потери на связь равны потерям внутри резонатора. На рис. 4, б приведен спектр пропускания для микросферы диаметром 200 μm . Величина нагруженной добротности резонанса составила $5.1 \cdot 10^6$, что сопоставимо с рекордными значениями для данного материала [32].

Микрорезонаторы из фторидного стекла ZBLAN

Для фторидного волокна ZBLAN предварительная подготовка волокна практически не отличается от вы-

шеописанной для As_2S_3 -волокна, за исключением того, что фторидное волокно имеет двойной слой полимерного покрытия, которое необходимо размачивать в течении 5 min в растворе ацетона. Также в отличие от предыдущей установки нагревательный элемент был заменен на самодельную спираль из нихромовой проволоки диаметром 2 mm и высотой 3 mm при диаметре проволоки 0.16 mm, питаемую источником постоянного тока. Необходимость замены нагревательного элемента была связана с тем, что для данного материала требовалось более равномерное распределение температуры при оптимальной скорости нагревания. Изготовление микросферических МШГ-резонаторов из ZBLAN проводилось при быстром (в течение 2 s) нагревании волокна с максимальной температурой 500°C внутри нагревательного элемента. Для питания нагревательного элемента использовался источник тока Keithley series 2220 с параметрами $V = 6.9 \text{ V}$, $I = 1.4 \text{ A}$. С помощью двух микроскопов, размещенных над и перед волоконной заготовкой, и прецизионной трехкоординатной подачи подготовленное волокно размещалось в центре спирального нагревательного элемента на определенной высоте H над волокном (рис. 5, а).

Конечный диаметр микросфер в данном случае зависит от начальной высоты размещения волокна внутри нагревательного элемента H и начального диаметра волокна. Для используемого в данной работе волокна ZBLAN толщиной 125 μm можно варьировать диаметры конечных микросфер в пределах 2–3 диаметра оболочки волокна (от 250 до 400 μm) при изменении параметра H от 0.2 до 0.4 mm. После охлаждения также проводится контроль качества поверхности микросферы. На рис. 5, б показаны фото готовых микросфер диаметрами 300 и 335 μm .

Для возбуждения МШГ использовалась экспериментальная установка, представленная на рис. 6, а. В каче-

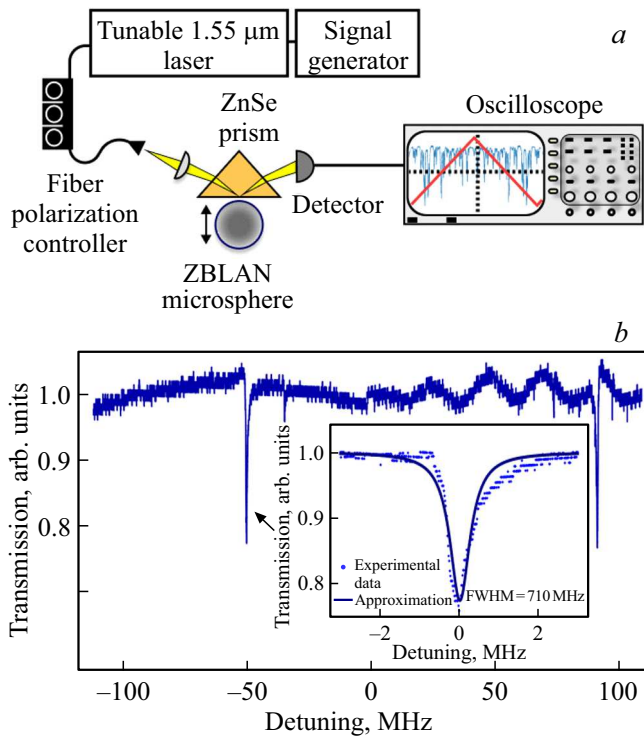


Рис. 6. (а) Экспериментальная установка для возбуждения МШГ. (б) Спектр пропускания для микросферы диаметром $310\ \mu\text{m}$ в режиме критической связи. FWHM равна $710\ \text{kHz}$, что соответствует собственной добротности, равной $5.4 \cdot 10^8$.

стве источника излучения использовался перестраиваемый диодный лазер непрерывного действия с длиной волны $1.55\ \mu\text{m}$ с волоконным выводом. После контроллера поляризации излучение выходит в свободное пространство и попадает в микрорезонатор через призму из селенида цинка (ZnSe), которая использовалась в качестве элемента связи. Микрорезонатор устанавливается на трехкоординатную подачу с пьезоконтроллером. Прошедший свет собирается на фотодетекторе. Для калибровки частоты использовался кварцевый эталон Фабри-Перо с областью свободной дисперсии $1.5\ \text{GHz}$. Используемый элемент связи позволяет варьировать величину связи с резонатором путем изменения расстояния между резонатором и элементом связи. Особо выделяют режим критической связи, когда потери за счет утечки энергии моды в элемент связи равняются собственным потерям резонатора. Такой режим соответствует наиболее глубокой резонансной кривой в спектре пропускания. Величина нагруженной добротности, измеренная в этом режиме, позволяет оценить величину собственной добротности резонатора, равную удвоенной величине нагруженной добротности.

На рис. 6, б показан спектр пропускания для резонатора диаметром $310\ \mu\text{m}$, во вложении приведена резонансная кривая, аппроксимированная функцией Лоренца с шириной $710\ \text{kHz}$, измеренная в режиме критической связи. Нагруженная добротность составила $2.7 \cdot 10^8$,

что соответствует собственному значению добротности $Q = 5.4 \cdot 10^8$ и является рекордным значением для данного материала. Ширина резонансной кривой одинакова при прямом и обратном сканировании частоты лазерного излучения, что говорит об отсутствии нелинейности. Такие резонансные кривые аппроксимируются функцией Лоренца. Небольшая разница между экспериментальной резонансной кривой и функцией аппроксимации вызвана флуктуациями мощности лазера и паразитными резонансами Фабри-Перо, возникающими из-за отражения от оптических элементов в экспериментальной установке.

Особенности изготовления микрорезонаторов из аморфных материалов

Величина добротности является одним из важнейших параметров МШГ микрорезонаторов, поэтому для получения высокодобротных микрорезонаторов необходимо подобрать оптимальный метод изготовления. Бюджет добротности в общем включает в себя материальные, излучательные потери, потери, связанные с рассеянием и поглощением неоднородностями внутри и на поверхности резонатора, и потери на связь. Из перечисленных контролируемых величинами являются добротность связи, добротность, связанная с излучательными потерями, и добротность, связанная с рассеянием на поверхности. Излучательные потери зависят от размера резонатора, и для резонаторов, размеры которых превышают несколько десятков длин волн, становятся пренебрежимо малы. Добротность связи можно изменять, варьируя расстояние между резонатором и элементом связи. Для уменьшения потерь, связанных с рассеянием на поверхности резонатора, необходимо уменьшать поверхностную шероховатость. Для этого в процессе изготовления необходимо определить все факторы, которые могут ухудшить качество поверхности, и устранить их. В данной работе в процессе изготовления были определены условия, при которых могли возникнуть различные дефекты на поверхности резонатора, связанные как со свойствами используемых материалов, так и с технологической реализацией процесса изготовления. На рис. 7, а продемонстрирован случай, связанный с некачественной предварительной подготовкой волокна, в результате которой частицы пыли либо остатки защитного полимерного покрытия вплавляются в поверхность. Данная проблема может быть легко устранена более тщательной очисткой поверхности волокна высокочистым изопропиловым спиртом перед процедурой плавления. Случаи, показанные на рис. 7, б и с, относятся к дефектам, связанным с нарушением температурного режима во время плавления и остывания. Несимметричное распределение температуры вокруг волоконной заготовки приводит к отклонениям формы резонатора от сферической, а также к изгибам волокна (рис. 7, б) [30,54]. Другой причиной появления изгибов является отличное

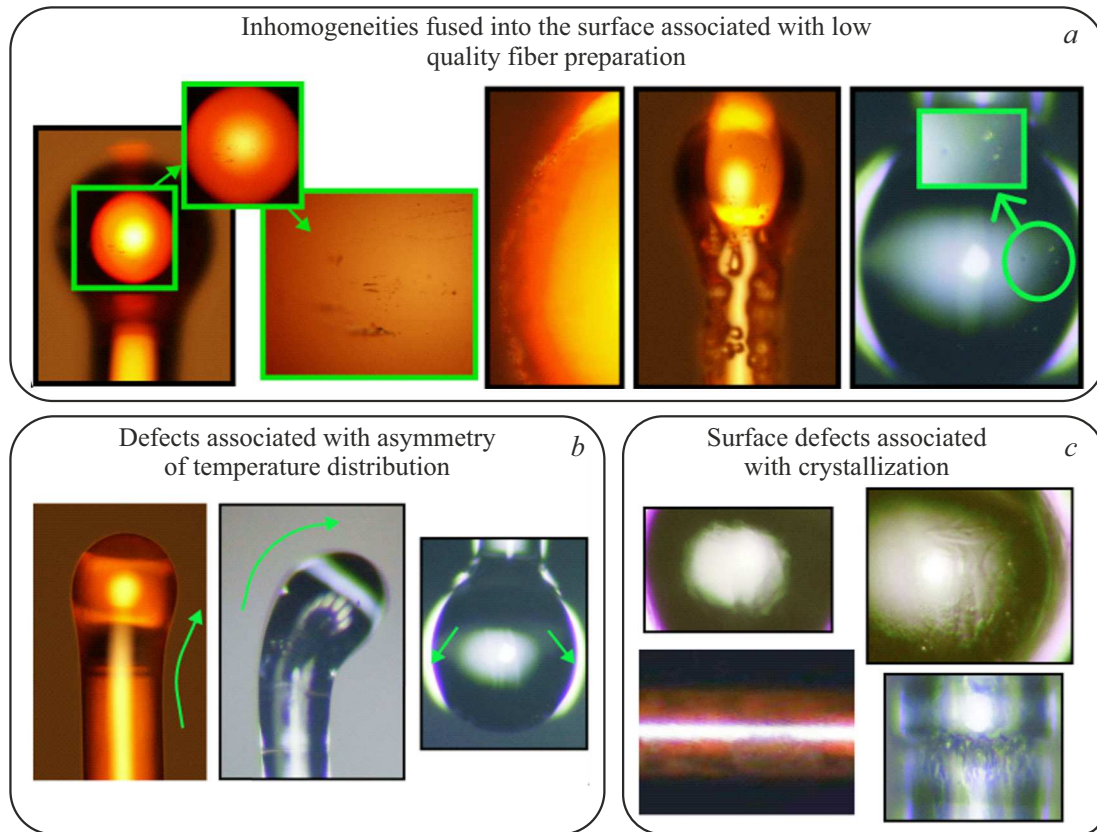


Рис. 7. (а) Дефекты связанные с неоднородностями на поверхности волокна перед процессом плавления. (б) Дефекты, связанные с несимметричностью распределения температуры. (с) Дефекты, связанные с кристаллизацией.

от вертикального расположения волокна в феруле оптического коннектора. Для одномодовых и многомодовых оптических волокон используются ферулы с диаметром отверстия 125 и 250 μm соответственно. При уменьшении толщины волокна во время закрепления с помощью универсального клея необходимо контролировать, чтобы волокно фиксировалось строго вертикально.

Наиболее сложными для устранения оказались дефекты, связанные с проявлением кристаллизации на поверхности резонаторов. Для фторидного волокна ZBLAN, используемого в нашей работе, ситуация также отягощается многокомпонентным составом волокна. Повышенная склонность к кристаллизации материала может сильно ухудшить качество поверхности сферы при остывании (рис. 7, с). Стеклообразующая способность материала зависит от сопротивляемости стекла процессу кристаллизации при охлаждении в диапазоне температур между температурой плавления и температурой кристаллизации. Для используемых в работе волокон разница между этими значениями температур относительно небольшая — температура кристаллизации варьируется в диапазоне 350–400 °C (ZBLAN), а температура плавления \sim 450 °C (ZBLAN). В работе [63] было экспериментально продемонстрировано, что температура начала кристаллизации зависит от скоростей нагревания и остывания

стекла, что позволяет подобрать оптимальную скорость для подавления кристаллизации.

В нашей работе использовались два вида нагревательных элементов — обычная паяльная станция и спиральный нагревательный элемент из нихромовой проволоки. Во время работы с волокнами из сульфида мышьяка и с использованием стандартной паяльной станции проблема с кристаллизацией при охлаждении легко решалась подбором скорости отведения нагревательного элемента от микросферы после плавления. Для сульфида мышьяка проблема с кристаллизацией на поверхности проявлялась только в процессе вытяжки волокна (рис. 7, с), что в дальнейшем делает его неприменимым в качестве заготовки под микросферы. При уменьшении толщины волокна во время плавления необходимо плавно подстраивать температуру, что в нашем случае решалось за счет увеличения скорости моторизированной подачи с нагревательным элементом с 15 до 30–40 $\mu\text{m/s}$.

При замене волокна на фторидное подобрать оптимальный температурный режим с использованием паяльной станции не удалось. Для получения симметричного распределения температуры внутри нагревательного элемента и для контроля скоростей нагревания и остывания был изготовлен спиральный нагревательный элемент из нихромовой проволоки. Также для удобства размещения волокна относительно центра нагреватель-

ного элемента использовался дополнительный микроскоп, размещенный над нагревательным элементом. Далее методом пошагового экспериментального подбора температуры и длительности нагревания были найдены оптимальные параметры, с помощью которых удалось устранить все описанные ранее факторы, приводящие к деформациям поверхности микросфер. С учетом подобранных параметров данный метод показывает хорошую воспроизводимость с высоким качеством поверхностей изготовленных микросфер.

Заключение

В настоящей работе продемонстрирован процесс изготовления высокодобротных микросферических МШГ-резонаторов из волокон сульфида мышьяка диаметрами от 50 до 500 μm и волокон фторидного стекла ZBLAN диаметрами от 250 до 400 μm , описаны факторы, которые могут приводить к дефектам на поверхности резонаторов в процессе изготовления и способы минимизации их влияния. Используемый метод обеспечивает хорошую воспроизводимость параметров изготовленных микрорезонаторов в сочетании с высоким качеством поверхности создаваемых микросфер. Разработанная методика позволяет достичь уровня добротности микрорезонаторов, сравнимого с величинами, рекордными для используемых материалов. Преимущества описываемого метода — относительная простота и высокая скорость производства: для изготовления одной микросферы от предварительной подготовки волокна до получения готовой микросферы требуется около 10 min.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90184.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.B. Braginsky, M.L. Gorodetsky, V.S. Ilchenko. *Phys. Lett. A*, **137**, 393–397 (1989). DOI: 10.1016/0375-9601(89)90912-2
- [2] K.J. Vahala. *Nature*, **424**, 839–846 (2003). DOI: 10.1038/nature01939
- [3] V.S. Ilchenko, A.B. Matsko. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **12**, 15–32 (2006). DOI: 10.1109/JSTQE.2005.862943
- [4] J. Zhu, S.K. Ozdemir, Y.-F. Xiao, L. Li, L. He, D.-R. Chen, L. Yang. *Nature Photonics*, **4**, 46–49 (2010). DOI: 10.1038/nphoton.2009.237
- [5] J. Ward, O. Benson. *Laser & Photonics Reviews* **5**, 553–570 (2011). DOI: 10.1002/lpor.201000025
- [6] F. Vollmer, S. Arnold. *Nature Methods* **5**, 591–596 (2008). DOI: 10.1038/nmeth.1221.
- [7] F. Vollmer, H.G.L. Schwefel. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **223**, 1907–1916 (2014). DOI: 10.1140/epjst/e2014-02271-2
- [8] G. Lin, A. Coillet, Y.K. Chembo. *Adv. Opt. Photon., AOP* **9**, 828–890 (2017). DOI: 10.1364/AOP.9.000828
- [9] T. Kippenberg. *Nonlinear Optics in Ultra-high-Q Whispering-Gallery Optical Microcavities*, Ph.D thesis, California Institute of Technology, 2004. URL: <https://thesis.library.caltech.edu/2487/>.
- [11] A. Pasquazi, M. Peccianti, L. Razzari, D.J. Moss, S. Coen, M. Erkintalo, Y.K. Chembo, T. Hansson, S. Wabnitz, P. Del’Haye, X. Xue, A.M. Weiner, R. Morandotti. *Physics Reports* **729**, 1–81 (2018). DOI: 10.1016/j.physrep.2017.08.004
- [11] Y. Deng, R.K. Jain, M. Hossein-Zadeh. *Optics Lett.*, **39**, 4458 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.004458
- [12] B. Behzadi, R.K. Jain, M. Hossein-Zadeh. *Laser Physics Lett.*, **15**, 085112 (2018). DOI: 10.1088/1612-202X/aac5c8
- [13] L. He, Ş.K. Özdemir, L. Yang. *Laser & Photonics Reviews* **7**, 60–82 (2013). DOI: 10.1002/lpor.201100032
- [14] R.R. Galiev, N.G. Pavlov, N.M. Kondratiev, S. Kopytaev, V.E. Lobanov, A.S. Voloshin, A.S. Gorodnitskiy, M.L. Gorodetsky. *Opt. Express*, **26**, 30509–30522 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.030509
- [15] W. Liang, V.S. Ilchenko, D. Eliyahu, A.A. Savchenko, A.B. Matsko, D. Seidel, L. Maleki. *Nature Communications* **6**, 7371 (2015). DOI: 10.1038/ncomms8371
- [16] A.E. Shitikov, I.I. Lykov, O.V. Benderov, D.A. Chermoshentsev, I.K. Gorelov, A.N. Danilin, R.R. Galiev, N.M. Kondratiev, S.J. Cordette, A.V. Rodin, A.V. Masalov, V.E. Lobanov, I.A. Bilenko, *Opt. Express*, **31**, 313–327 (2023). DOI: 10.1364/OE.478009
- [17] S. Arnold, D. Keng, S.I. Shopova, S. Holler, W. Zzurawsky, F. Vollmer. *Opt. Express* **17**, 6230 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.006230
- [18] W. von Klitzing, R. Long, V.S. Ilchenko, J. Hare, V. Lefèvre-Seguin. *New J. Phys.* **3**, 14–14 (2001). DOI: 10.1088/1367-2630/3/1/314
- [19] B. Behzadi, R.K. Jain, M. Hossein-Zadeh. *IEEE J. Quantum Electron.*, **53**, 1–9 (2017). DOI: 10.1109/JQE.2017.2771423
- [20] S. Jiang, C. Guo, K. Che, Z. Luo, T. Du, H. Fu, H. Xu, Z. Cai. *Photon. Res.*, **7**, 566–572 (2019). DOI: 10.1364/PRJ.7.000566
- [21] A.E. Shitikov, I.A. Bilenko, N.M. Kondratiev, V.E. Lobanov, A. Markosyan, M.L. Gorodetsky. *Optica*, **5**, 1525–1528 (2018). DOI: 10.1364/OPTICA.5.001525
- [22] R. Shankar, I. Bulu, M. Lončar. *Applied Physics Lett.* **102**, 051108 (2013). DOI: 10.1063/1.4791558
- [23] D. Ren, C. Dong, S.J. Addamane, D. Burghoff. *Nature Communications* **13**, 5727 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-32706-1
- [24] R. Armand, M. Perestjuk, A. Della Torre, M. Sinobad, A. Mitchell, A. Boes, J.-M. Hartmann, J.-M. Fedeli, V. Reboud, P. Brianceau, A. De Rossi, S. Combrié, C. Monat, C. Grillet. *APL Photonics*, **8**, 071301 (2023). DOI: 10.1063/5.0149324
- [25] T.-H. Xiao, Z. Zhao, W. Zhou, C.-Y. Chang, S.Y. Set, M. Takenaka, H.K. Tsang, Z. Cheng, K. Goda. *Opt. Lett.*, **43**, 2885 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.002885
- [26] P. Wang, T. Lee, M. Ding, A. Dhar, T. Hawkins, P. Foy, Y. Semenova, Q. Wu, J. Sahu, G. Farrell, J. Ballato, G. Brambilla. *Opt. Lett.*, **37**, 728 (2012). DOI: 10.1364/OL.37.000728

- [27] I.S. Grudin, K. Mansour, N. Yu. Opt. Lett., **41**, 2378 (2016). DOI: 10.1364/OL.41.002378
- [28] W. Liang, A.B. Matsko, A.A. Savchenkov, V.S. Ilchenko, D. Seidel, L. Maleki, In: 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, p. 1–6. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977304
- [29] C. Lecaplain, C. Javerzac-Galy, M.L. Gorodetsky, T.J. Kippenberg. Nature Communications, **7**, 13383 (2016). DOI: 10.1038/ncomms13383
- [30] B. Way, R.K. Jain, M. Hossein-Zadeh. In: IEEE Photonics Conference 2012, p. 143–144.
- [31] R.K. Jain, B. Way, M. Klopfer, I. Small, M. Saad, M. Hossein-Zadeh. In: IEEE Photonics Conference 2012, p. 727–728.
- [32] F. Vanier, P. Bianucci, N. Godbout, M. Rochette, Y.-A. Peter. In: 2012 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (2012), p. 45–46.
- [33] A.V. Andrianov, E.A. Anashkina. Opt. Express, OE **29**, 5580–5587 (2021). DOI: 10.1364/OE.415787
- [34] E.A. Anashkina, A.A. Sorokin, M.P. Marisova, A.V. Andrianov. J. Non-Crystalline Solids, **522**, 119567 (2019). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.119567
- [35] F. Vanier. *Nonlinear optics in chalcogenide and tellurite microspheres for the generation of mid-infrared frequencies*, Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal, 2015. URL: <https://publications.polymtl.ca/2021/>
- [36] V.S. Ilchenko, A.A. Savchenkov, A.B. Matsko, L. Maleki. Phys. Rev. Lett., **92**, 043903 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.043903
- [37] K.N. Minkov, A.N. Danilin, A.E. Shitikov, I.K. Gorelov, M.L. Galkin, A.V. Mantuzov, E.A. Artemov, M.I. Krasivskaya, V.E. Lobanov, I.A. Bilenko. J. Opt. Technol., **89**, 691 (2022). DOI: 10.1364/JOT.89.000691
- [38] K.N. Min'kov, G.V. Likhachev, N.G. Pavlov, A.N. Danilin, A.E. Shitikov, A.I. Yurin, E.A. Lonshakov, F.V. Bulygin, V.E. Lobanov, I.A. Bilenko. J. Opt. Technol., **88**, 348 (2021). DOI: 10.1364/JOT.88.000348
- [39] M.L. Gorodetsky, A.A. Savchenkov, V.S. Ilchenko. Optics Lett., **21**, 453–455 (1996). DOI: 10.1364/OL.21.000453
- [40] J.M. Ward, Y. Wu, K. Khalfi, S.N. Chormaic. Review of Scientific Instruments, **81**, 073106 (2010). DOI: 10.1063/1.3455198
- [41] G.R. Elliott, G.S. Murugan, J.S. Wilkinson, M.N. Zervas, D.W. Hewak. Opt. Express, OE **18**, 26720–26727 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.026720
- [42] Y. Xie, D. Cai, J. Pan, N. Zhou, Y. Gao, Y. Jin, X. Jiang, J. Qiu, P. Wang, X. Guo, L. Tong. Small, **17**, 2100140 (2021). DOI: 10.1002/sml.202100140
- [43] D. O'Shea, C. Junge, S. Nickel, M. Pöllinger, A. Rauschenbeutel. In: *Laser Resonators and Beam Control XIII* (International Society for Optics and Photonics, 2011), vol. 7913, p. 79130N.
- [44] G.S. Murugan, J.S. Wilkinson, M.N. Zervas. Opt. Express, OE **17**, 11916–11925 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.011916
- [45] S.B. Papp, P. Del'Haye, S.A. Diddams. Phys. Rev. X, **3**, 031003 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevX.3.031003
- [46] P. Del'Haye, S.A. Diddams, S.B. Papp. Appl. Phys. Lett., **102**, 221119 (2013). DOI: 10.1063/1.4809781
- [47] M. Sumetsky, J.M. Fini. Opt. Express, OE **19**, 26470–26485 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.026470
- [48] M. Sumetsky. Progress in Quantum Electronics, **64**, 1–30 (2019). DOI: 10.1016/j.pquantelec.2019.04.001
- [49] N.A. Toropov, M. Sumetsky. Opt. Lett., **41**, 2278 (2016). DOI: 10.1364/OL.41.002278.
- [50] M. Sumetsky, Y. Dulashko. Opt. Express, OE **20**, 27896–27901 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.027896
- [51] F. Vanier, M. Rochette, N. Godbout, Y.-A. Peter. Opt. Lett., OL **38**, 4966–4969 (2013). DOI: 10.1364/OL.38.004966
- [52] F. Vanier, Y.-A. Peter, M. Rochette. Opt. Express, OE **22**, 28731–28739 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.028731
- [53] D.K. Armani, T.J. Kippenberg, S.M. Spillane, K.J. Vahala. Nature, **421**, 925–928 (2003). DOI: 10.1038/nature01371
- [54] B. Way, R.K. Jain, M. Hossein-Zadeh. Opt. Lett., OL **37**, 4389–4391 (2012). DOI: 10.1364/OL.37.004389
- [55] P. Wang, G.S. Murugan, G. Brambilla, M. Ding, Y. Semenova, Q. Wu, G. Farrel. IEEE Photonics Technology Lett., **24**, 1103–1105 (2012). DOI: 10.1109/LPT.2012.2195722
- [56] M. Poulain, M. Poulain, J. Lucas. Materials Research Bulletin **10**, 243–246 (1975). DOI: 10.1016/0025-5408(75)90106-3
- [57] Л.В. Жукова, А.С. Корсаков, А.Е. Львов, Д.Д. Салимгареев. *Волоконные световоды для среднего инфракрасного диапазона* (Екатеринбург, УМЦ УПИ, 2016).
- [58] B.J. Eggleton. Opt. Express, OE **18**, 26632–26634 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.026632
- [59] L. Zhang, F. Gan, P. Wang. Appl. Opt., AO **33**, 50–56 (1994). DOI: 10.1364/AO.33.000050
- [60] Е.А. Анашкина. *Дисперсионные и нелинейные свойства сферических микрорезонаторов на основе различных стекол* (Ниžний Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2019).
- [61] L. Wetenkamp, G.F. West, H. Többen. J. Non-Crystalline Solids, **140**, 35–40 (1992). DOI: 10.1016/S0022-3093(05)80737-9
- [62] L.A. Harrington. *Infrared Fibers and Their Applications* (SPIE Press, 2004).
- [63] T.-C. Ong, B. Fogarty, T. Steinberg, E. Jaatinen, J. Bell. International Journal of Applied Glass Science, **10**, 391–400 (2019). DOI: 10.1111/ijag.13096