

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 стекла 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

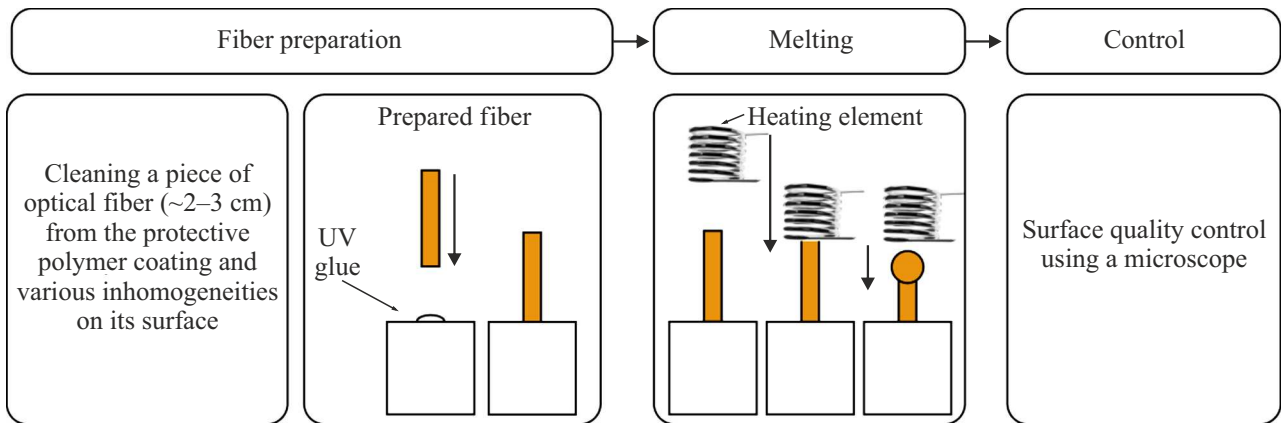


Рис. 1. Схема изготовления аморфных резонаторов из оптического волокна.

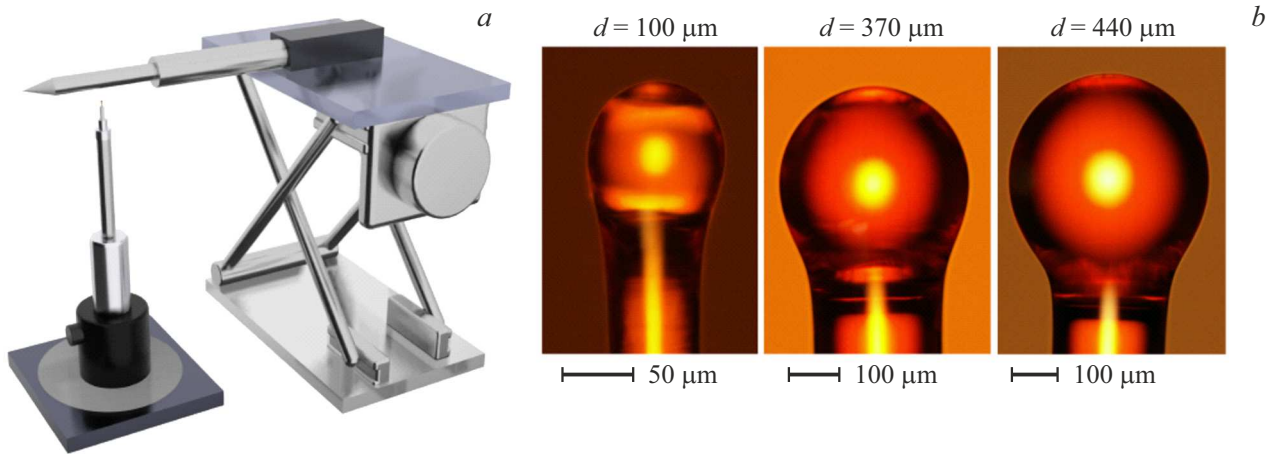


Рис. 2. (а) Схема экспериментальной установки для изготовления микрорезонаторов из сульфида мышьяка. В качестве нагревательного элемента используется жало паяльника, закрепленное на подвижках для перемещения по высоте и точной центровки относительно сферы. (б) Фото готовых микросфер из сульфида мышьяка 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 оплавляться, приобретая сферическую форму. Во время плавления волокно сокращается по длине и отдалается 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

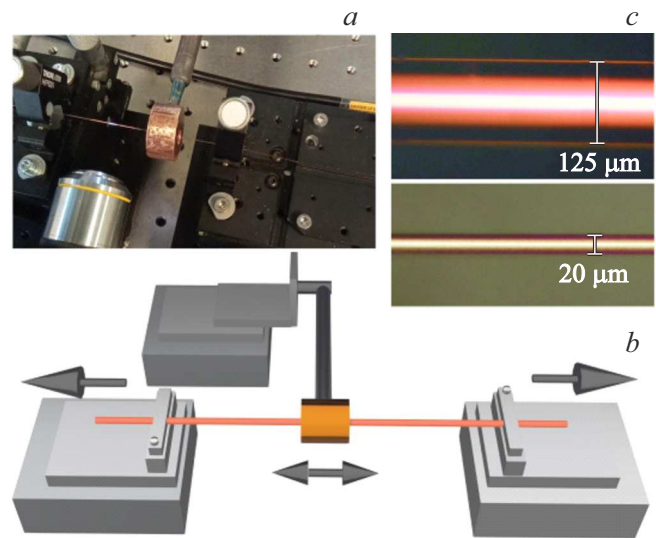


Рис. 3. (a) Фото нагревательного элемента с волокном. (b) Схема экспериментальной установки для растяжения волокна из сульфида мышьяка. (c) Фото волокон до и после растяжения.

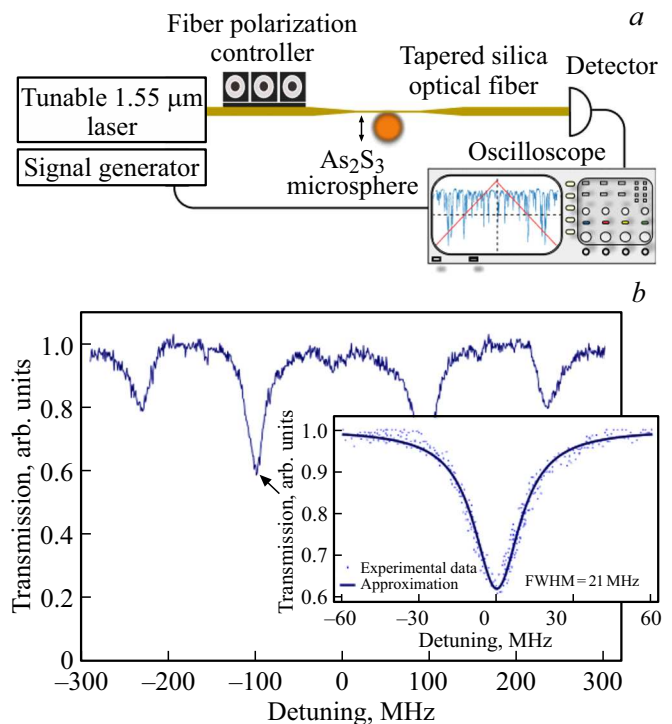


Рис. 4. (a) Экспериментальная установка для возбуждения МШГ. (b) Спектр пропускания для микросферы диаметром $200\ \mu\text{m}$. Во вложении представлена резонансная кривая, аппроксимированная функцией Лоренца с шириной, равной $24\ \text{MHz}$, что соответствует нагруженной добротности $Q = 5.1 \cdot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

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

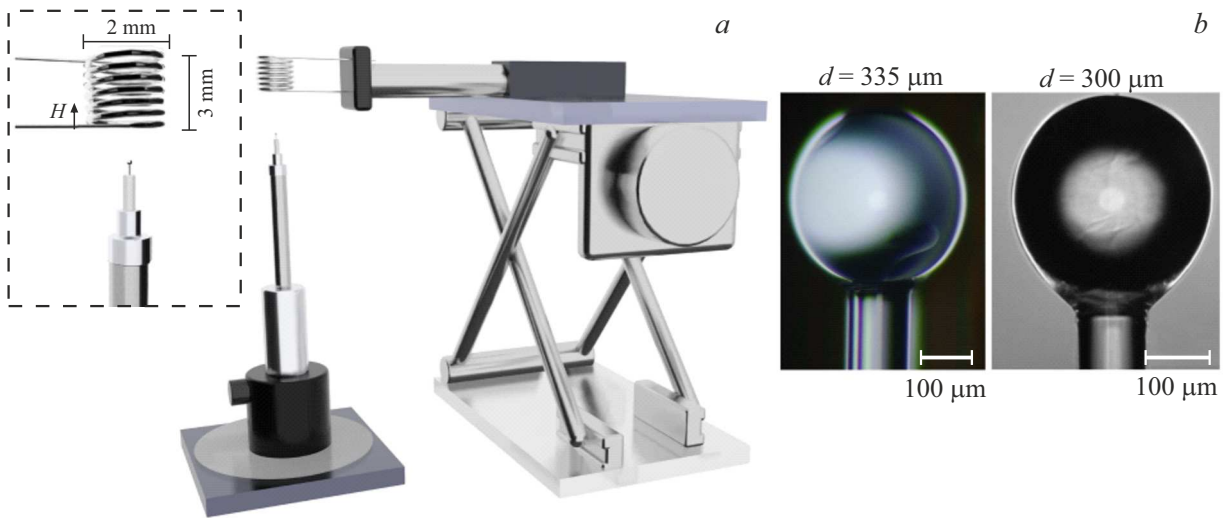


Рис. 5. (а) Схема экспериментальной установки для изготовления микрорезонаторов из фторидного ZBLAN. В качестве нагревательного элемента используется спираль из нихромовой проволоки. (б) Фото готовых микросфер диаметрами 300 и 335 μm .

В результате были получены микросферические резонаторы из сульфида мышьяка диаметрами от 50 до 500 μm . На рис. 2, *b* 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, *a*. 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, *b* 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, *a*).

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, *b* показаны фото готовых микросфер диаметрами 300 и 335 μm .

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

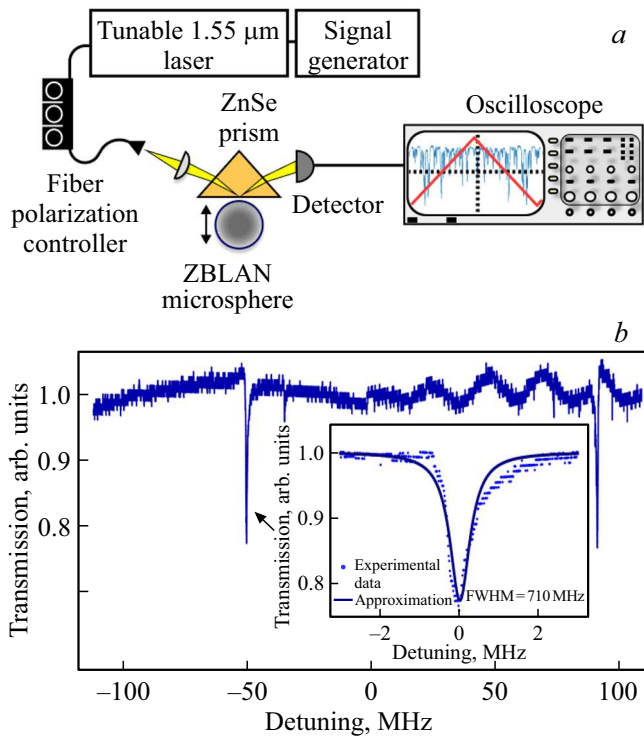


Рис. 6. (а) Экспериментальная установка для возбуждения МШГ. (б) Спектр пропускания для микросферы диаметром $310\ \mu\text{m}$ в режиме критической связи. FWHM равна $710\ \text{kHz}$, что соответствует собственной добротности, равной $5.4 \cdot 10^8$.

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

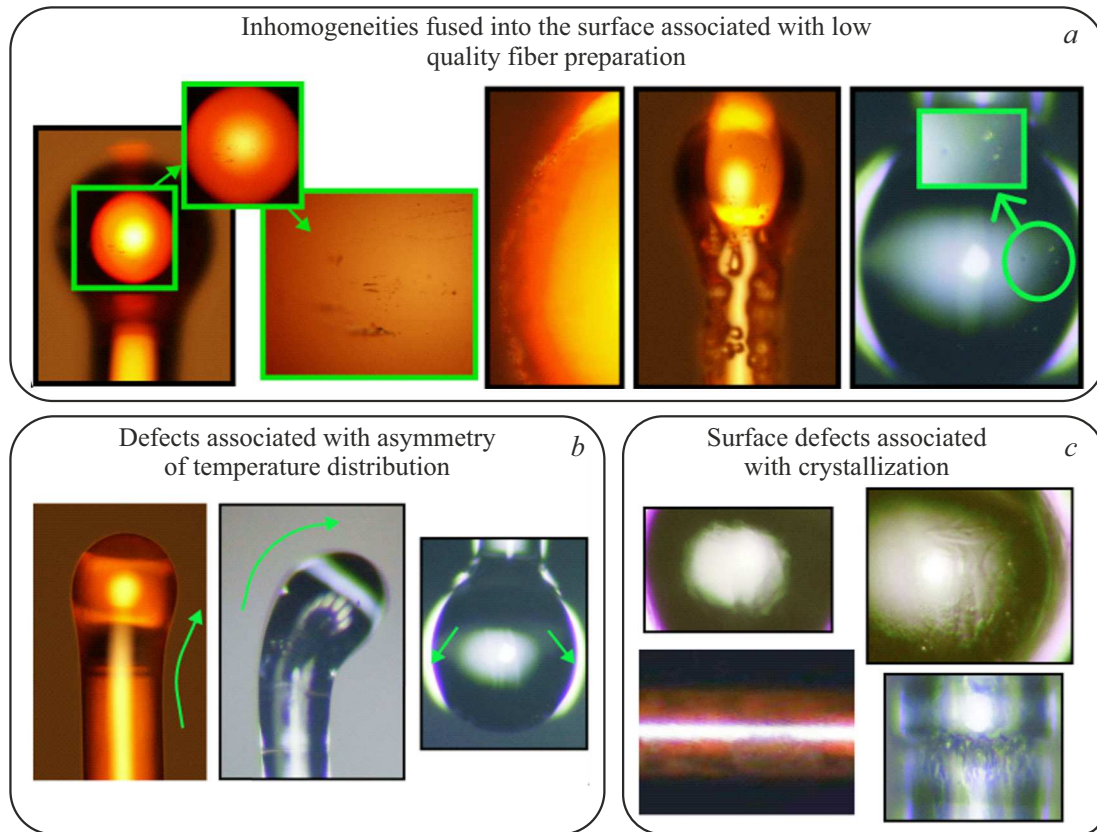


Рис. 7. (а) Дефекты, связанные с неоднородностями на поверхности волокна перед процессом плавления. (б) Дефекты, связанные с несимметричностью распределения температуры. (с) Дефекты, связанные с кристаллизацией.

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.*, **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* (УМЦ УПИ, Екатеринбург, 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* (Нижегородский госуниверситет, Нижний Новгород, 2019).
- [61] L. Wetenskap, 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