

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С СУБМИКРОННЫМ ДИАМЕТРОМ

© 2024 г. К. Н. Миньков^{a,*}, Д. Д. Ружицкая^a, О. В. Боровкова^{a,b}, С. В. Власов^a,
М. Л. Галкин^c, А. С. Амелькин^a, В. Е. Лобанов^a, И. А. Биленко^{a,b}

^aРоссийский квантовый центр

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

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

^cСколковский институт науки и технологий

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

*e-mail: k.minkov@rqc.ru, k.n.minkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 13.07.2023 г.

Принята к публикации 30.07.2023 г.

Разработана методика полностью автоматизированного производства оптического волокна с субволновым диаметром. Приведено подробное описание реализованной автоматизированной установки, позволяющей получать кварцевые волокна с рекордно малым диаметром перетяжки 400 нм, длиной растянутого участка до 100 мм и уровнем потерь в пропускании 0.4 дБ на длине волны 1550 нм. Воспроизводимость параметров волокон с заданной геометрией составляет $\pm 30\%$. Предложенная методика полностью автоматизированного производства позволяет существенно упростить и стандартизировать производство волоконно-оптических элементов с субволновым диаметром для создания эффективных элементов связи для оптических микрорезонаторов с гигантской добротностью, а также для изготовления субволновых волокон для задач оптической фильтрации и абсорбционной спектроскопии.

DOI: 10.31857/S0032816224020214 EDN: QRJWIW

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические волокна (ОВ) с субмикронным диаметром (subwavelength-diameter optical fiber, tapered fiber) — это оптические волокна с диаметром, близким или меньшим, чем длина волны распространяющегося в них излучения [1]. В зависимости от рабочих длин волн диаметр таких волокон варьируется от нескольких микрон до десятков нанометров.

Преимущества и особенности субволновых ОВ позволяют успешно применять их в различных волоконно-оптических схемах и устройствах, где требуются короткие оптические пути, малые габариты и низкое энергопотребление [2]. Например, в работах [3, 4] была продемонстрирована эффективность субволновых ОВ для создания оптических соединений и различного рода разветвителей. В работе [5] при помощи

постепенного сокращения диаметра ОВ авторы уменьшали длину волны отсечки и добивались существенного ослабления мод высших порядков. Таким образом, субволновые ОВ могут обеспечивать эффективную фильтрацию мод высших порядков. Помимо этого, значительное выпадающее поле субволновых ОВ широко используется для создания чувствительных сенсоров наночастиц и молекул в приложениях абсорбционной спектроскопии [6, 7]. Образцы субволновых ОВ могут использоваться для управления шириной континуума [8].

В данной работе основное внимание уделено еще одному важному практическому приложению субволновых ОВ, а именно, волоконным элементам связи для оптических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи (МШГ) [9–11]. Кристаллические микрорезонаторы

обладают малыми размерами и гигантской добротностью, превышающей 10^9 , что позволяет использовать их для эффективной реализации различных нелинейно-оптических и квантово-оптических процессов [12, 13], в том числе для генерации оптических частотных гребенок [14–17], используемых в различных областях науки и техники, включая спектроскопию, метрологию, астрофизику, телекоммуникации и многие другие [18–20]. Важно отметить, что использование субволновых ОВ является наиболее предпочтительным и широко распространенным способом для связи с кристаллическими микрорезонаторами [21], который позволяет достигать величины эффективности связи вплоть до 99.95%, т. е. ограниченной только поглощением в материале ОВ [10, 22]. С развитием фотоники и широким применением оптических высокодобротных микрорезонаторов из различных материалов и с разнообразной геометрией возникла необходимость изготовления большого количества субволновых ОВ с диаметром порядка 400 нм для эффективной связи за счет согласования пространственных мод. Таким образом, необходима разработка методик и коммерчески доступных установок, позволяющих получать субволновые ОВ с заданными техническими характеристиками.

Наиболее часто субволновые ОВ изготавливаются из стандартного одномодового ОВ, диаметр которого постепенно уменьшается с образованием перетяжки, а затем этот диаметр возвращается к стандартному размеру. На сегодняшний день известно множество установок для получения субволновых ОВ, различающихся типом нагревательного элемента, техникой и алгоритмом растяжения [23–27].

Наибольшей популярностью в данной области пользуются установки с газовыми горелками. Это связано с тем, что газовые горелки обладают высокой точностью управления температурой и скоростью растяжения, что позволяет получать волокна с заданными характеристиками и повторяемостью процесса. Кроме того, газовые горелки отличаются экономичностью в использовании, что также упрощает их использование в промышленном производстве.

Основной трудностью при изготовлении субволновых ОВ является одновременное получение всех требуемых характеристик. Достижению воспроизводимости параметров изготовленного

волокна препятствуют недостаточная стабильность и равномерность нагрева, приводящая к существенному разбросу параметров волокна, несовершенство методов контроля параметров *in situ*, а также шумы, вибрации и случайные ошибки, связанные с человеческим фактором. Конструкции предыдущих поколений установок позволяют получать волокна с диаметрами перетяжки порядка 3 мкм и коэффициентом пропускания 98% [23].

Стоит отметить, что существующие образцы коммерчески доступных приборов не могут изготавливать растянутые волокна с необходимым набором параметров и нужной степенью точности. Так, установки Fujikura FSM серии 100 ограничены геометрическими параметрами производимых тейперов и не обеспечивают строгую адиабатическую форму конусного перехода, что снижает эффективность связи. Taper station FTM - A от Lightcomm и установка GPX4200 от Thorlabs наиболее близки к требуемым характеристикам, но их высокая стоимость делает их труднодоступными для пользователей.

В данной работе предложена полностью автоматизированная и усовершенствованная установка для производства субволновых ОВ с заданными характеристиками на базе установки предыдущего поколения [23]. В новой установке:

- усовершенствована система подачи газа, что позволило добиться более равномерного и стабильного нагрева волокна;
- разработан новый способ тушения горелки, что предотвращает обрыв готового волокна;
- полностью автоматизирован и оптимизирован процесс вытяжки субволновых ОВ при помощи использования прецизионной юстировки направляющих, увеличения жесткости элементов установки, создания защиты от механических вибраций, обеспечения защиты от механического разрушения субволновых ОВ;
- усовершенствована и автоматизирована процедура контроля параметров ОВ при помощи разработки оригинального ПО.

Предложенные усовершенствования дают возможность получать на созданной установке широкий диапазон геометрических размеров субволновых ОВ: диаметр волокна варьируется от 400 нм до 90 мкм, а длина вытянутого участка может достигать 100 мм с обеспечением адиабатического перехода на всем растянутом участке.

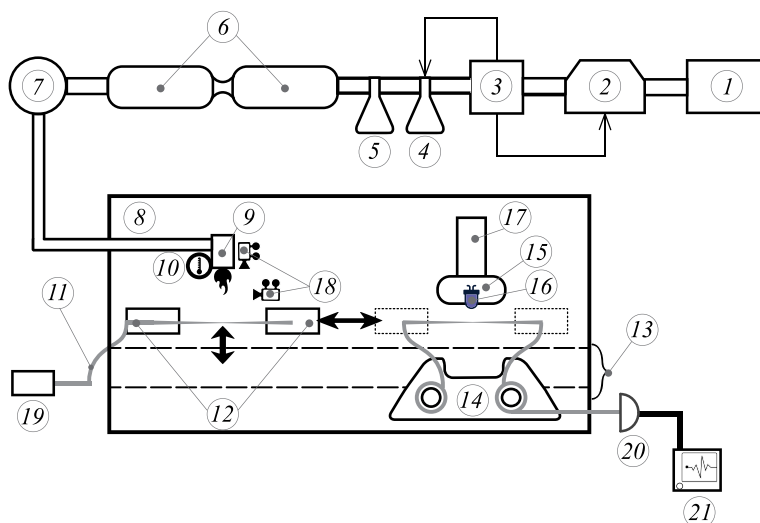


Рис. 1. Схема установки: 1 – блок питания, 2 – электролизер, 3 – барботер, 4 – водный затвор, 5 – этиловый затвор, 6 – осушители, 7 – регулятор расхода топливной смеси, 8 – оптическая плита, 9 – система управления пламенем, 10 – датчик контроля температуры, 11 – оптическое волокно (ОВ), 12 – система растяжения ОВ; 11, 13 – направляющие для перемещения ОВ, 15 – вилка для запекания растянутого волокна, 16 – ультрафиолетовые диоды для заклеивания ОВ, 17 – система подведения вилки 14; 18 – система видеонаблюдения, 19 – непрерывный лазер, 20 – фотодетектор, 21 – осциллограф.

Модифицированная установка также позволяет существенно сократить время изготовления и обеспечивает высокую воспроизводимость характеристик субволновых ОВ: заданные значения диаметров перетяжки и оптического пропускания достигаются с точностью $\pm 30\%$.

2. УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУБВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Установка по растяжению ОВ состоит из трех функциональных систем: системы подачи топливной смеси, механической системы подвижек, осуществляющих автоматизированное перемещение и растяжение ОВ, и оптической системы для контроля параметров изготовленного субволнового ОВ. Схема установки показана на рис. 1.

Система подачи топливной смеси содержит в себе следующие элементы. Блок питания 1, служащий для поджига, тушения и отключения пламени, подключается к электролизеру ОГО ННО 2, состоящему из нескольких пар проводящих пластин и особо чистого электролита – водного раствора гидроксида калия (КОН) в объеме 100 мл. Благодаря использованию особо чистого электролита в гранулах КОН вместо химического чистого гидроксида калия, применявшегося в установке предыдущего поколения [23], достигается более высокая чистота

пламени. Образующаяся кислородно-водородная смесь подается в барботер 3. Барботер представляет собой сосуд, к которому снизу и сверху подключены два шланга для отделения пены от топливной смеси и предотвращения тушения пеной пламени. Пена стекает по нижнему шлангу обратно в электролизер 2, а полученная горючая смесь попадает в систему жидкостных затворов. Водный затвор 4 содержит в себе дистиллированную воду и является предохранителем установки от возгорания смеси, а затвор 5, содержащий очищенный этиловый спирт, позволяет очистить полученную кислородно-водородную смесь. После этого для удаления паров воды и спирта горючая смесь попадает в установленные друг за другом осушители 6, содержащие гранулы цеолита. После этого топливная смесь проходит через регулятор расхода газа 7 (клапан РРГ20), который позволяет контролировать расход газа с точностью до 0.1%, а следовательно, высоту и температуру пламени за счет установления порогового уровня потока смеси. К регулятору при помощи шланга подключается сопло, установленное в системе управления пламенем 9 на оптической плите 8. Система управления пламенем 9 содержит в себе датчик контроля температуры 10, а также систему поджига и тушения пламени. Для поджига используется высокочастотная дуга, через которую пропускается

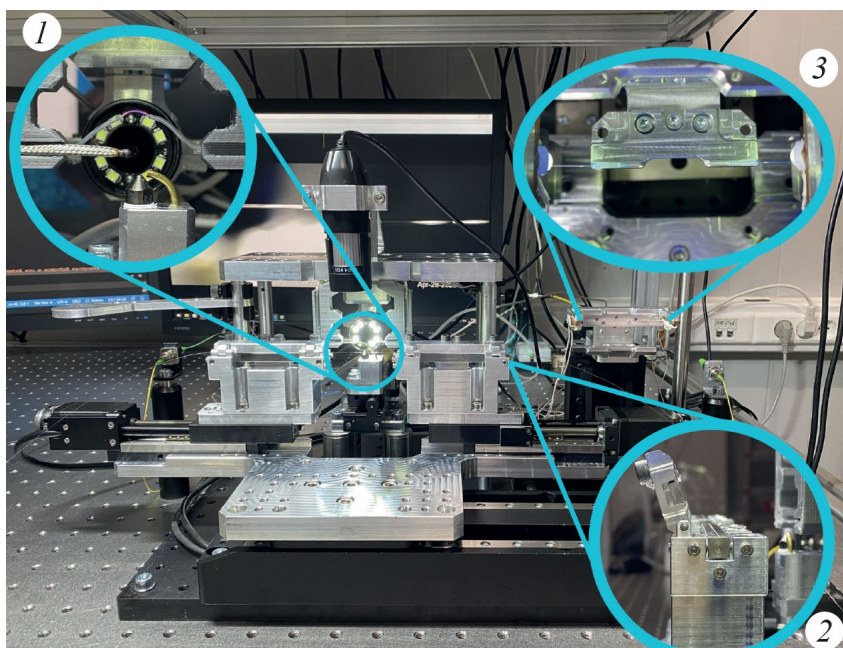


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки: 1 – увеличенное изображение системы высокочастотного поджига и тушения пламени сжатым воздухом, контроль процесса горения осуществляется при помощи термопары; 2 – внешний вид системы фиксации волокна в направляющей с регулировкой по 4 степеням свободы; 3 – увеличенное изображение системы полимеризации клея на изготовленном волокне, закрепленном на вилке.

ток силой 5 А, а для тушения – сжатый воздух, подаваемый через металлическую трубочку.

Механическая система осуществляет перемещение и растяжение ОВ 11 на оптической плите 8 при помощи программного управления прецизионными моторизованными подачами и состоит из двух функциональных частей: системы для растяжения ОВ (левая часть установки на рис. 1) и заклеивания растянутого ОВ (правая часть установки на рис. 1). Система растяжения ОВ 11 включает в себя две одинаковые подачи 12 с V-образными направляющими, которые имеют регулировку по четырем степеням свободы, расположены на одной оси и осуществляют растяжение волокна. Они устанавливаются в раму на третьей подаче, которая осуществляет возвратно-поступательные движения относительно неподвижного сопла, что обеспечивает равномерный нагрев участка волокна необходимой длины. Четвертая подача находится в системе управления пламенем 9 и осуществляет перемещение сопла к волокну, что позволяет производить поджиг и тушение пламени вдали от волокна, уменьшая вероятность его повреждения.

После получения необходимой геометрии ОВ вытянутая часть перемещается в правую часть установки на рис. 1, предназначенную для заклеивания растянутого ОВ, при помощи

направляющих 13 (перемещенные части показаны пунктирными линиями). Система заклеивания растянутого ОВ содержит в себе вилку 15, на которой при помощи клея фиксируется растянутый участок ОВ. Клей Norland optical Adhesive 65 наносится из инсулинового шприца. Вилка представляет собой П-образный универсальный держатель волокна, который применяется для удобной эксплуатации волокна при экспериментальной работе. Для подвода вилки служит система 17, позволяющая подвести вилку снизу растянутого волокна и зафиксировать его в специально изготовленной катушке 14. Затем ультрафиолетовые диоды 16 полимеризуют предварительно нанесенный клей. Далее катушка устанавливается в кейс для переноски, а волокно сворачивается в специальные катушки.

Для визуального контроля за процессом растяжения установка оснащена системой видеонаблюдения 18, состоящей из двух видеокамер. Первая расположена горизонтально и позволяет визуально контролировать растяжение или провисание ОВ. Вторая камера расположена вертикально над соплом и позволяет контролировать положение сопла относительно волокна. Волокно должно быть расположено сбоку от пламени, иначе струя пламени будет изгибать волокно.

Оптическая система установки необходима для наблюдения и контроля параметров ОВ. Она включает в себя непрерывный лазер VitaWave ECDL-15510RG с рабочей длиной волны 1550 нм 19, к которому подключены ОВ, фотодетектор Thorlabs DET01CFC/M 20 и осциллограф Keysight InfiniiVision DSO-X 2002A 21. Внешний вид установки представлен на рис. 2.

С целью увеличения воспроизводимости изготовления субволнового ОВ и уменьшения влияния внешних факторов установку рекомендуется устанавливать и использовать в чистой комнате класса ИСО-7, соответствующей стандарту ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017.

3. МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУБВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Для вытягивания волокна в данной работе используется одномодовое кварцевое оптическое волокно Thorlabs SM-28 ultra, которое работает в диапазоне длин волн от 980 до 1600 нм. Однако возможна работа и с другими видами волокна, такими как 980-HP и S600. Номинальный диаметр сердцевины выбранного волокна составляет 8 мкм, а диаметр оболочки 125 мкм. Выбор данного волокна обусловлен использованием лазерного излучения с длиной волны 1550 нм для связи с оптическими микрорезонаторами в ряде экспериментов и минимальным поглощением ОВ на данной длине волны.

Перед началом растяжения волокна проводятся следующие ручные операции: с части волокна, которая будет вытягиваться, удаляется защитная полимерная оболочка и проводится очистка зачищенного участка ОВ. После этого заготовка для перетяжки субволновых ОВ устанавливается в направляющие зажимных опор с регулируемым усилием. Свободные концы ОВ подключаются к лазеру и фотодетектору для контроля выходных параметров ОВ в процессе растяжения. Затем ОВ натягивается с помощью пошагового смещения подач до устранения провисания ОВ — натянутое ОВ должно быть параллельно поверхности оптической плиты. Контроль положения подач осуществляется при помощи системы видеонаблюдения.

Затем проводится юстировка системы растяжения. Для этого необходимо, чтобы ось волокна была коллинеарна направлениям движений подач, как показано на рис. 2. Волокно помещается

в канавку на отполированной направляющей и фиксируется при помощи креплений. Отклонения направления волокна фиксируются при помощи системы видеонаблюдения и устраняются при помощи регулировочных винтов. Необходимо также убедиться, что направления движения подвижек коллинеарны оси волокна. Измерение отклонения оси каждой подвижки проводится отдельно при помощи камер системы видеонаблюдения. Величина смещения волокна оценивается в программном пакете “GNU Image Manipulation Program” один раз, а затем проверяется при включении установки.

После подготовительных операций осуществляется поджиг пламени горелки при помощи программного управления. Для этого используется высокочастотная дуга, благодаря применению которой предотвращается осаждение любых частиц на установленном ОВ. На этом этапе необходимо проконтролировать следующие моменты: расход кислородно-водородной смеси должен быть установлен при помощи регулятора расхода на уровне 7.6 л/ч при диаметре сопла 0.4 мм. При таком расходе горючей смеси наблюдается минимальное устойчивое горение пламени без срыва и достигается необходимая для плавления кварца температура, контролируемая при помощи датчика температуры при высоте пламени 5.3 мм. После этого необходимо подвести пламя к установленному в подвижках ОВ таким образом, чтобы оно не искажало профиль изготавливаемого субволнового ОВ. Для этого необходимо подобрать высоту сопла относительно ОВ так, чтобы наблюдалось устойчивое растяжение ОВ. Таким образом, ОВ будет располагаться сбоку от пламени.

Последующие операции по растяжению ОВ происходят в автоматическом режиме, что позволяет уменьшить влияние человеческого фактора. Алгоритм растяжения ОВ работает следующим образом. При нагреве зачищенной части ОВ (его длина задается амплитудой качания рамы) подачи с закрепленным ОВ раздвигаются в противоположные стороны. Скорость и ускорение движения этих подач необходимо подбирать для предотвращения провисания или разрыва ОВ в процессе растяжения. Форма растянутого волокна задается законом изменения длины L нагреваемого участка в процессе растяжения [28]. Наиболее простым законом является линейный — $L(x) = L_0 + ax$, где L_0 — начальная длина нагреваемого участка, x — удлинение волокна

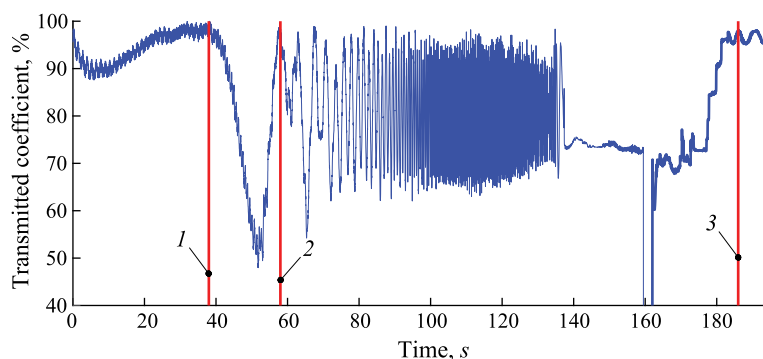


Рис. 3. Диаграмма зависимости коэффициента пропускания от времени вытягивания: 1 — начало нагрева ОВ, 2 — переход ОВ в многомодовый режим, 3 — окончание процесса растяжения.

на текущий момент, a — коэффициент качания. После серии проведенных испытаний для получения идеальной адиабатической формы перетяжки, которая требуется для обеспечения максимальной эффективности связи субволнового ОВ с микрорезонатором, были подобраны следующие оптимальные параметры: начальная длина нагреваемого участка — 2 мм, коэффициент качания — 0.01. Подачи при этом в начале раздвигаются с фиксированной скоростью 0.4 мм/с, а при дальнейшем нагреве и растяжении ОВ их движению добавляется ускорение 0.2 мм/с².

Имеется также возможность задавать произвольную форму перехода, как и диаметр и длину перетяжки, если применять соответствующий закон изменения длины нагреваемого участка $L(x)$.

Алгоритм вычисления $L(x)$ интегрирован в программу, управляющую процессом растяжения ОВ. Так, форму перехода можно задать такую, что сам переход будет оставаться адиабатическим, но его длина при этом будет минимально возможной. Впрочем, получить субволновое ОВ с такой формой перехода не вышло. Воспроизводимо ее удается получить для волокон с диаметром перетяжки порядка десятка мкм (скорость разъезда подач при этом фиксирована и равна 0.03 мм/с).

На протяжении всего процесса растяжения осуществляется контроль коэффициента пропускания ОВ. Для этого излучение от непрерывного лазера 19 (рис. 1) направлялось через установленное ОВ 11 (рис. 1) и регистрировалось при помощи фотодетектора 20 (рис. 1) и осциллографа 21 (рис. 1). Затем проводилась оценка эффективности передачи света через ОВ путем вычисления отношения амплитуды сигнала при отсутствии ОВ к амплитуде прошедшего через

ОВ излучения. Пример спектра пропускания ОВ при его растяжении показан на рис. 3. Здесь вертикальные линии обозначают следующие этапы растяжения: кривая 1 соответствует началу нагрева ОВ после его закрепления в направляющих. После этого начинается движение подач, и в сигнале пропускания начинают наблюдаться биения (кривая 2). В этот момент наблюдается характерная картина интерференции мод, указывающая на переход ОВ в многомодовый режим. Вытягивание волокна продолжается до тех пор, пока биения коэффициента пропускания не установятся на постоянном уровне (кривая 3). В представленном образце коэффициент пропускания составляет 98%, а время вытяжки занимает не более 3 мин.

После завершения процесса растяжения проводится отвод пламени и его тушение. Отвод пламени перед его тушением необходим для того, чтобы не повредить растянутое волокно малого диаметра. Нужно подчеркнуть, что благодаря такому технологическому решению удалось добиться сохранения неповрежденными субволновых ОВ с предельно малыми диаметрами перетяжек.

Затем нужно устранить провисание волокна под собственным весом, для этого необходимо подтянуть растянутое ОВ перед закреплением на вилке. Подтягивание волокна осуществляется минимально возможным перемещением одной из подач, контроль осуществляется при помощи измерения коэффициента пропускания ОВ.

На следующем этапе подвижки перемещаются по направляющим во вторую часть установки для заклеивания, включающую два ультрафиолетовых диода мощностью 3 Вт с рабочей длиной волны 360–365 нм. Данный этап позволяет закрепить полученное субволновое ОВ

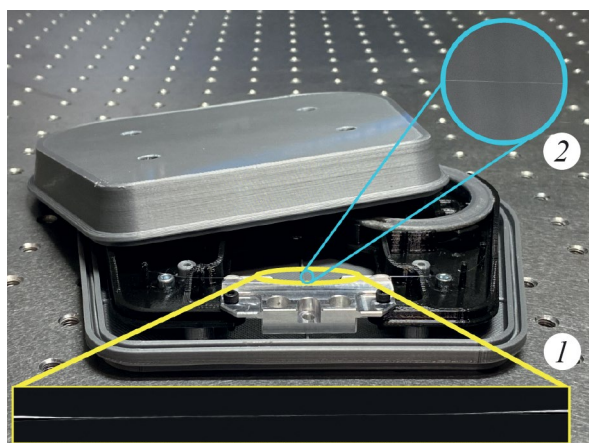


Рис. 4. Внешний вид кейса с вилкой, на которой закреплено изготовленное волокно: 1 – склейка вытянутой части волокна, полученная на электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific Quattro S с увеличением 7000X, длина растянутой части 22 мм; 2 – фотография перетяжки растянутой части изготовленного волокна, полученная на электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific Quattro S с увеличением 8000X, диаметр перетяжки составил 300 нм.

и предотвратить его повреждение. Затем волокно приклеивается к держателю и убирается в защитный кейс, показанный на рис. 4.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты работы установки показывают значительное улучшение качества полученных образцов субволновых ОВ при одновременном уменьшении времени производства. Для оценки характеристик и качества волокон был использован электронный микроскоп Thermo Fisher Scientific Quattro S. Результаты измерений профиля изготовленного субволнового ОВ представлены на рис. 4. Оптическое волокно имеет адиабатический переход к центру перетяжки, обеспечивающий коэффициент пропускания не менее 90%. Полученные образцы растянутого ОВ были исследованы на интерференционном микроскопе, который показал, что среднее значение шероховатости RMS (Root Mean Squared) составляет около 1 нм. Кроме того, на установке возможно получение субволнового ОВ в широком диапазоне геометрических размеров: диаметр волокна варьируется от 90 мкм до 400 нм, а длина вытянутого участка может достигать 100 мм с обеспечением адиабатического перехода на всем растянутом участке.

Также стоит отметить, что предложенная установка обеспечивает воспроизводимость характеристик субволнового ОВ. Стабильность

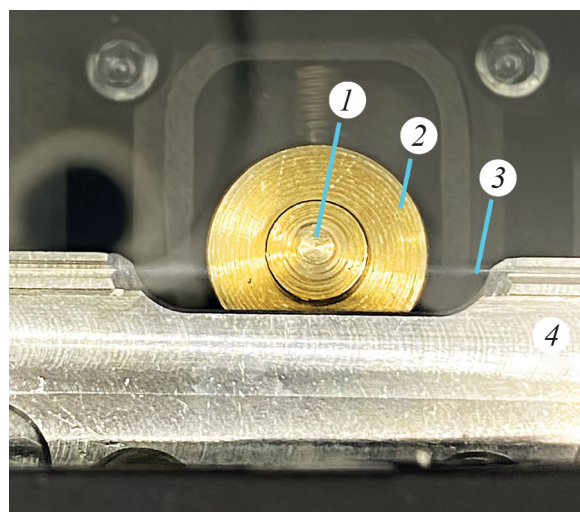


Рис. 5. Резонатор из BaMgF_4 с прецизионно подвешенным при помощи вилки изготовленным волокном: 1 – микрорезонатор, 2 – держатель микрорезонатора, 4 – вилка с изготовленным волокном 3.

и высокая точность параметров работы установки позволяют получить заданные значения диаметров перетяжки и оптического пропускания с точностью $\pm 30\%$. Данные показатели стали возможными благодаря конструктивным изменениям установки за счет полной автоматизации процесса вытяжки, увеличения жесткости элементов установки и защиты от вибраций. Прецизионная юстировка направляющих позволила значительно увеличить величину пропускания изготовленных волокон, а также дала возможность натягивать волокно без разрыва. Модернизация системы подготовки кислородо-водородной смеси также положительно отразилась на стабильности пламени и ламинарности потока. Автоматизация системы тушения горелки позволила получать минимальные диаметры перетяжки волокна в несколько сотен нанометров вместо нескольких микрометров. Дополнительно разработанный герметичный кейс (рис. 3) для упаковки субволнового ОВ обеспечивает безопасную транспортировку волокна.

Геометрия субволнового ОВ, полученная на описанной автоматизированной установке, обладает необходимой жесткостью для минимизации влияния электрического заряда на созданные на основе субволнового ОВ элементы связи с оптическими микрорезонаторами МШГ, что является необходимым условием для обеспечения эффективной стабильной связи с микрорезонатором. На рис. 5 показан микрорезонатор с МШГ, изготовленный из кристалла BaMgF_4 ,

с радиусом образующей 600 мкм и добротностью $Q = 5 \cdot 10^8$. Для возбуждения МШГ используется источник излучения с рабочей длиной волны 1550 нм, а изготовленное субволновое ОВ подводится при помощи вилки. При этом достигается эффективность связи с микрорезонатором, равная 90%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данной работе полностью автоматизированная усовершенствованная установка для производства оптических волокон с субмикронным диаметром позволила значительно сократить время производства и повысить качество изготавливаемых волокон. Достигнутый широкий диапазон параметров изготавливаемых волокон, а также высокая степень их воспроизводимости позволяют существенно расширить диапазон применений волокон с субмикронным диаметром для решения актуальных прикладных и научных задач, в том числе и для создания эффективных элементов связи с высокодобротными оптическими микрорезонаторами с различной геометрией.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ВНИИОФИ (сскр.vniiofi.ru) и ЦКП “Визуализации высокого разрешения” Сколтеха (<https://www.skoltech.ru>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 20-12-00344).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tong L., Zi F., Guo X., Lou J. // Opt. Comm. 2012. V. 285. P. 4641. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.07.068>
2. Tong L., Gattass R.R., Ashcom J.B., He S., Lou J., Shen M., Maxwell I., Mazur E. // Nature. 2003. V. 426. P. 816. <https://doi.org/10.1038/nature02193>
3. Tong L., Lou J., Gattass R.R., He S., Chen H., Liu L., Mazur E. // Nano Lett. 2005. V. 5. P. 259. <https://doi.org/10.1021/nl0481977>
4. Sumetsky M. // Opt. Lett. 2006. V. 31. P. 3240. <https://doi.org/10.1364/OL.31.003420>

5. Donlagic D. // J. Light Technol. 2006. V. 24. P. 3532. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.878497>
6. Lou J., Tong L., Ye Zh. // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 2135. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.002135>
7. Warken F., Vetsch E., Meschede D., Sokolowski M., Rauschenbeutel A. // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 11952. <https://doi.org/10.1364/OE.15.011952>
8. Kobisev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V. // Quantum Electronics. 2002. V. 32. P. 11. <https://doi.org/10.1070/QE2002v032n01ABEH002117>
9. Matsko A.B., Ilchenko V. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2006. V.12. P. 3. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2005.862952>
10. Горюшецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. Москва: Физматлит, 2011.
11. 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>
12. Strekalov D.V., Marquardt C., Matsko A.B., Schweffel H.G.L., Leuchs G. // J. Opt. 2016. V. 18. P. 123002. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/12/123002>
13. Lin G., Coillet A., Chembo Y.K. // Adv. Opt. Photon. 2017. V. 9. P.828. <https://doi.org/10.1364/AOP.9.000828>
14. Del'Haye P., Schliesser A., Arcizet O., Wilken T., Holzwarth R., Kippenberg T.J. // Nature. 2007. V. 450. P. 1214. <https://doi.org/10.1038/nature06401>
15. Kippenberg T.J., Holzwarth R., Diddams S.A. // Science. 2011. V. 332. P. 555. <https://doi.org/10.1126/science.1193968>
16. Herr T., Brasch V., Jost J.D., Wang C.Y., Kondratiev N.M., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. // Nat. Phot. 2014. V. 8. P. 145. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.343>
17. Pasquazi A., Peccianti M., Razzari L., Moss D.J., Coen S., Erkintalo M., Chembo Y.K., Hansson T., Wabnitz S., Del'Haye P., Xue X., Weiner A.M., Morandotti R. // Physics Reports. 2018. V. 729. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.08.004>
18. Udem T., Holzwarth R., Hänsch T. // Nature. 2002. V. 416. P. 233. <https://doi.org/10.1038/416233a>
19. Fortier T., Baumann E. // Commun. Phys. 2019. V. 2. P. 153. <https://doi.org/10.1038/s42005-019-0249-y>
20. Sun Y., Wu J., Tan M., Xu X., Li Y., Morandotti R., Mitchell A., Moss D.J. // Adv. Opt. Photon. 2023. V. 15. P. 86. <https://doi.org/10.1364/AOP.470264>
21. Spillane S.M., Kippenberg T.J., Painter O.J., Vahala K.J. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 043902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.043902>
22. Righini G.C., Dumeige Y., Féron P., Ferrari M., Nunzi Conti G., Ristic D., Soria S. // Riv. Nuovo Cim. 2011. V. 34. Iss. 7. P. 435. <https://doi.org/10.1393/ncr/i2011-10067-2>

23. *Ivanov A.D., Min'kov K.N., Samoilenko A.A.* // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. P. 500.
<https://doi.org/10.1364/JOT.84.000500>
24. *Иванов А.Д., Миньков К.Н., Самойленко А.А.* // Оптический журнал. 2017. Т. 84. С. 86.
25. *Dimmick T.E., Kakarantzas G., Birks T.A., Russell P.St.J.* // Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 6845.
<https://doi.org/10.1364/ao.38.006845>
26. *Shi L., Chen X., Liu H., Chen Y., Ye Z., Liao W., Xia Y.* // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 5055.
<https://doi.org/10.1364/OE.14.005055>
27. *Hoffman J.E., Ravets S., Grover J.A., Solano P., Kordell P.R., Wong-Campos J.D., Orozco L.A., Rolston S.L.* // AIP Adv. 2014. V. 4. P. 067124.
<https://doi.org/10.1063/1.4879799>
28. *Birks T.A., Li Y.W.* // J. Light Technol. 1992. V. 10. № 4. P. 432.
<https://doi.org/10.1109/50.134196>