

РАДИОФОТОНИКА

Оптимизация методики изготовления растянутых световодов для связи с оптическими микрорезонаторами

Р.В. Терентьев, А.Е. Шитиков, И.А. Биленко,

К.Н. Миньков, Р.Р. Галиев, М.Л. Городецкий 2

Оптимизация методики изготовления растянутых световодов для связи с оптическими микрорезонаторами

Р.В. Терентьев^{1,2}, А.Е. Шитиков^{1,3}, И.А. Биленко^{1,3}, К.Н. Миньков^{4,5}, Р.Р. Галиев^{1,3},
М.Л. Городецкий^{1,3}

¹*Российский квантовый центр, 143025, Сколково*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, 199991, Москва*

³*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, 199991, Москва*

⁴*Московский институт электроники и математики, Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, 123458, Москва*

⁵*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, 119361, Москва*
terentyev_ruslan@mail.ru

Оптические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи являются перспективными и активно исследуемыми элементами оптических систем. Их уникальные спектральные свойства, а именно, высокая добротность, стабильность по отношению к внешним условиям, перестраиваемость и узкая линия, вместе с малыми габаритами делают их весьма привлекательными для множества практических применений. Среди многочисленных областей применения микрорезонаторов с модами шепчущей галереи можно назвать фильтрацию сигналов, стабилизацию частоты лазеров, применение в высокочувствительных сенсорах биомолекул.

Существуют различные способы возбуждения мод шепчущей галереи в микрорезонаторах. Одними из самых распространенных способов связи с микрорезонаторами являются связь с помощью призмы, связь с помощью сошлифованного оптического волокна и связь с помощью растянутого световода, изготовленного из оптического волокна. Все эти методы основаны на эффекте спадающего поля и позволяют с большой гибкостью регулировать параметры связи [1]. Использование световода, изготовленного из растянутого оптического волокна для связи с микрорезонаторами с модами шепчущей галереи обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами связи — простотой использования, большей компактностью и надежностью. Поэтому создание методики получения таких световодов с перетяжкой малой толщины (не более 4 мкм) и большой (не менее 5 мм) длиной перетяжки является актуальной задачей.

В литературе были описаны различные методики получения растянутого оптического волокна. Для создания перетяжки необходимо нагреть растягиваемый участок оптического волокна до температуры размягчения кварцевого стекла (около 1400 °С) и растянуть участок, перемещая концы растягиваемого участка вручную или с помощью шаговых двигателей. Для получения такой температуры можно использовать пламя водородно-кислородной горелки, свечу накаливания специальной конструкции с керамическим корпусом, защищающим растягиваемое волокно от попадания испаряющегося материала нити накаливания, или CO₂ лазер. Возможно также получение растянутого волокна путем химического травления материала волокна с помощью плавиковой кислоты. Применение пламени горелки для достижения температуры размягчения оптического волокна является наиболее надежным и простым методом. Требуемую температуру можно получить в пламени водородно-кислородной горелки, причем пламя должно быть максимально чистым, поскольку при попадании примеси на расплавленное волокно его пропускание снижается. Необходимо соблюдать специальную процедуру предварительной очистки растягиваемого участка [2]. Важна также правильная юстировка держателей

оптического волокна, которые должны быть максимально соосными [3]. Применение прецизионных шаговых двигателей значительно увеличивает повторяемость эксперимента растяжки, а методика качания пламени увеличивает длину расплавляемого участка, что увеличивает длину перетяжки [4,5], длина перетяжки составляет 5 мм.

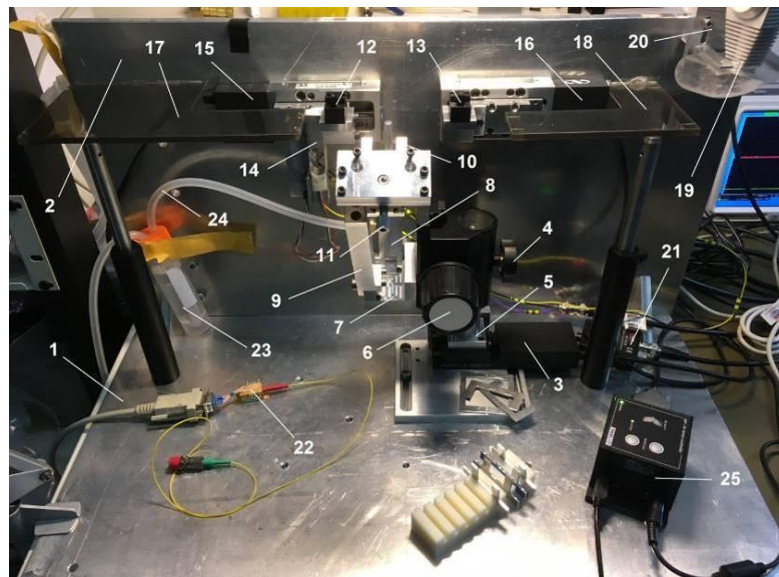


Рис. 1. Общий вид установки для получения растянутого оптического волокна. Условные обозначения: 1 – плита, 2 – стенка, 3 – подача Thorlabs MTS25-Z8, 4 – крепежный винт, 5 – стойка, 6 – винт регулировки высоты горелки, 7 – откидной держатель, 8 – горелка, 9 – держатель оправок, 10 – оправка, 11 – винт регулировки положения оправки, 12 и 13 – зажимы для оптического волокна, 14 – тензометрический датчик, 15 и 16 – шаговые двигатели, 17 и 18 – полки, 19 – УФ-лампа, 20 – держатель лампы, 21 – фотодетектор DET10A, 22 – лазерный диод 1550 нм, 23 – барботер, 24 – силиконовый шланг, 25 – драйвер шагового двигателя.

Нами была создана экспериментальная установка для получения растянутого оптического волокна (рис. 1). Конструктивно установка представляет собой массивную металлическую плиту, на которой установлена моторизованная подача с откидывающейся горелкой. Перпендикулярно основанию установлена вертикальная металлическая стенка, на которой закреплены прецизионные шаговые двигатели с держателями для крепления оптического волокна. На одном из держателей закреплен тензометрический датчик с усилителем, предназначенный для контроля натяжения оптического волокна. Для нагрева оптического волокна до температуры плавления использовалась водородно-кислородная горелка; в качестве сопел использовались медицинские иглы диаметром 0,8 мм. Водородно-кислородная смесь получалась в результате электролиза воды в стехиометрической пропорции. Газовый поток по силиконовым шлангам с внутренним диаметром 4 мм поступал в редуктор, а затем в барботер, служивший для защиты электролизера от взрыва газовой смеси в случае попадания пламени внутрь горелки. С помощью подвижной подачи пламя (и точка плавления волокна) циклически перемещались вдоль растягиваемого волокна со скоростью 1-2 мм/с. Образец волокна растягивался двумя шаговыми двигателями со скоростью 0,18-0,2 мм/с. Управление шаговыми двигателями и подвижной подачей осуществлялось с помощью специально разработанного программного обеспечения. Контроль пропускания оптического волокна осуществлялся при помощи лазерного диода с длиной волны 1550 нм, излучение которого пропускалось через растягиваемый участок и детектировалось с помощью фотодетектора.

Подготовка образца для растяжения включала в себя припайку коннекторов к растягиваемому участку оптического волокна и очистку растягиваемого участка от пластиковой оболочки. Готовый образец закреплялся в держателях шаговых двигателей, после чего проводилась специальная процедура очистки участка от пыли и остатков пластиковой оболочки: растягиваемый участок несколько раз протирался салфеткой, смоченной сначала ацетоном, а затем метанолом. Затем производился поджиг отведенной от волокна водородно-кислородной горелки и включалось перемещение горелки вдоль волокна. Пламя подводилось на рабочее расстояние от сопла до волокна (21-23 мм) и одновременно запускались шаговые двигатели растяжения. После достижения требуемой толщины одновременно с отведением горелки от волокна останавливались шаговые двигатели растяжения и перемещения горелки вдоль волокна. После гашения горелки в держатель, закрепленный на одной подаче с горелкой, вставлялась оправка для вклеивания волокна, которая подводилась под растягиваемый участок. Растягиваемый участок волокна при необходимости (в случае заметной кривизны растянутого участка) дотягивался со скоростью 0,002 мм/с, и вклеивался в оправку при помощи светоотверждаемого клея.

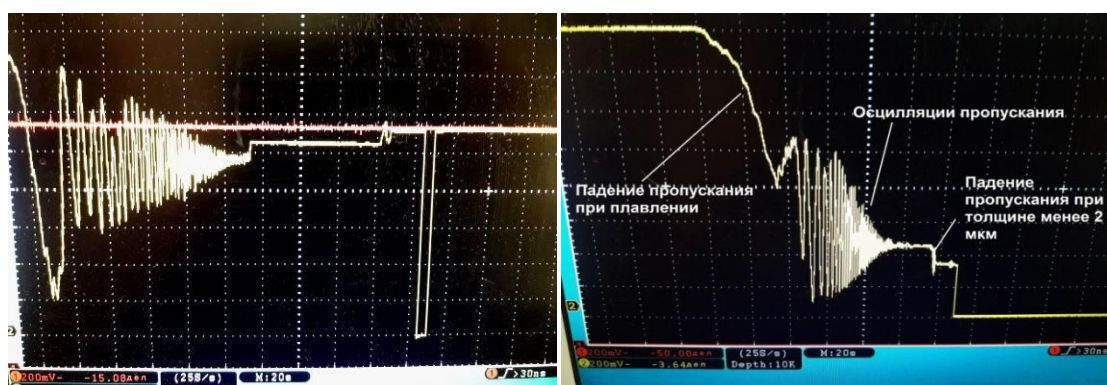


Рис. 2. Осциллограммы изменения пропускания оптического волокна в процессе растяжения.

На основании литературных данных [5] скорость растяжения волокна в первых экспериментах устанавливалась равной 0,02 мм/с. Однако было обнаружено, что при низкой скорости растяжения после того, как волокно достигает точки размягчения, оно начинает выгибаться под действием газовой струи горелки, что приводит к резкому снижению пропускания. Поэтому скорость растяжения была увеличена до 0,2 мм/с, после чего выгиб волокна был устранен. Также в ходе экспериментов были подобраны оптимальные величины газового потока и расстояния от сопла горелки до волокна. Было показано, что при малом расстоянии между соплом и волокном пропускание последнего падает экспоненциально.

В литературе особенно подчеркивается важность установки соосности магнитных держателей. Несоосность держателей приводит к возникновению изгибающих и скручивающих моментов в пластиковой оболочке и сердцевине волокна, что приводит к снижению остаточного пропускания [3]. В наших экспериментах при несоосных держателях остаточное пропускание не превышало 10%, поэтому соосность держателей контролировалась при помощи лазерного уровня, в результате пропускание достигало 80%.

Было установлено, что процесс растяжения состоит из трех отчетливо выраженных этапов (рис. 2). Сначала, при достижении температуры размягчения кварца, пропускание начинает уменьшаться. Затем, при дальнейшем нагреве с одновременным растягиванием, наблюдаются колебания (осцилляции) пропускания

вокруг общей экспоненциальной линии тренда. Осцилляции пропускания по мере уменьшения диаметра волокна затухают, и затем пропускание колеблется незначительно. После этого, в момент, примерно соответствующий достижению волокном толщины менее 2 мкм, на осциллограммах наблюдается небольшое падение пропускания менее чем на 5%, после чего пропускание вновь остается постоянным вплоть до момента окончательного разрыва волокна.

В результате нами были получены растянутые волокна с толщиной перетяжки 1-2 мкм и длиной перетяжки 5 мм. Пропускание растянутых образцов волокна достигало 80%. Далее, с помощью полученных образцов была получена связь с микрорезонатором с МШГ. В ходе экспериментов были достигнуты уровни связи 80-90% (в зависимости от семейства мод) с микрорезонатором из фторида магния (MgF_2) на длине волны 1550 нм, при этом наблюдались сильно выраженные нелинейности. На достаточно добротных модах были обнаружены оптические частотные гребенки, в том числе солитонные.

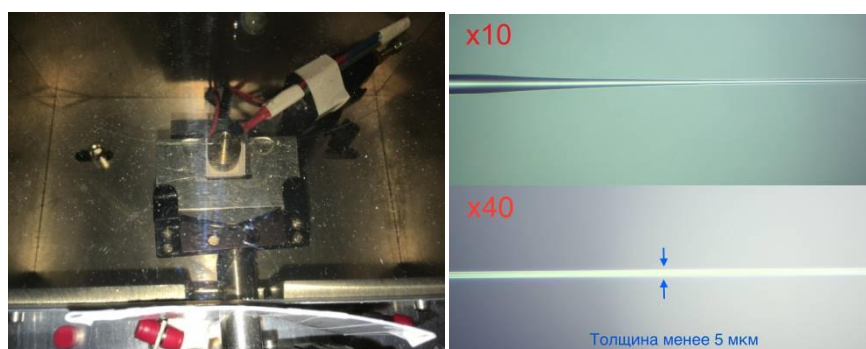


Рис. 3. Фотография установки для проведения экспериментов по связи с микрорезонаторами (слева); микрофотографии растянутого оптического волокна: участок образования перетяжки (справа сверху) и участок с минимальной толщиной (справа внизу).

Таким образом, нами была создана установка для получения растянутых световодов и воспроизводимая методика их получения. На основе анализа экспериментальных данных были оптимизированы ключевые параметры процесса растяжки и исследованы условия получения световодов различной толщины. Проведенные эксперименты подтвердили, что растянутые оптические волокна, полученные с помощью установки, пригодны для применения в качестве элементов связи с микрорезонаторами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект №17-02-00522).

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Л. Городецкий “Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью” М.: Физматлит, 2011.
2. J.E. Hoffman et al., // AIP Advances 2014, V. 4, 067124.
3. F. Warken, “Ultra thin glass fibers as a tool for coupling light and matter”, Ph.D. thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universitat, 2007.
4. T.A. Birks, Y.W. Li, // Journal of Lightwave Technology, 1992, V. 10, № 4, 432.
5. F. Bilodeau et al., // Journal of Lightwave Technology, 1988, V. 6, № 10, 1476.