

УДК 004.27,004.056.55

## КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СУЖЕННЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

© 2019 г. С. Н. Андрианов<sup>1, \*</sup>, Ю. Ю. Кочнева<sup>1</sup>, О. П. Шиндяев<sup>1</sup>, А. В. Шкаликов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение Республики Татарстан, Академия наук Республики Татарстан,  
Институт прикладных исследований, Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр  
“Казанский научный центр Российской академии наук”, Казань, Россия

\*E-mail: andrianovsn@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2019 г.

После доработки 20.07.2019 г.

Принята к публикации 27.08.2019 г.

Проведено исследование технологических процессов изготовления суженных волокон с устойчивой повторяемостью параметров при их нагреве с короткой не адиабатической областью сужения. В работе сообщается об экспериментальной реализации метода изготовления суженных волокон с заданными параметрами электроискровым методом на установке со специальными возможностями для реализации этих процессов.

**DOI:** 10.1134/S0367676519120044

### ВВЕДЕНИЕ

В современной цифровой экономике необходимы датчики различных физических величин, которые могли бы собирать информацию о состоянии цифровой системы и передавать ее на центральный процессор. Для этого целесообразно использовать волоконные датчики, так как оптические волокна могут служить одновременно как чувствительный элемент и как средство передачи информации. При этом наиболее технологически удобны датчики на основе суженного волокна, так как в таких датчиках излучение не выходит из волокна и монолитность конструкции системы не нарушается.

Для обеспечения высокой чувствительности и компактности датчиков необходимо использовать суженные волокна с малой длиной суженной части. Поэтому необходимо, чтобы общая область сужения была достаточно короткой. С другой стороны, длина суженного волокна не должна быть слишком мала, так как в противном случае могут произойти существенные потери излучения и даже физический облом волокна. Поэтому необходимо обеспечить устойчивую повторяемость изготовления суженного волокна с критическими параметрами, определяемыми вышеуказанными соображениями. Существующая стандартная аппаратура для вытягивания волокон не обеспечивает такой повторяемости. В данной работе мы рассматриваем технологические процессы изготовления суженных волокон с короткой

областью сужения и устойчивой повторяемостью параметров.

### ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ СУЖЕННОГО ВОЛОКНА

В работе [1] предложен датчик температуры на основе волокон с разными диаметрами сердцевин. В нем два волокна с большим значением диаметра сердцевин соединены между собой в стык волокном с меньшим диаметром. На первом стыке часть излучения передается в моды оболочки, а другая часть остается в сердцевине соединяющего волокна. На втором стыке эти моды вновь объединяются и интерферируют. Вся конфигурация представляет собой компактный интерферометр Маха–Цендера, модовый спектр которого выражается как

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi. \quad (1)$$

Здесь разность фаз задается формулой

$$\varphi = \Delta\beta L, \quad (2)$$

где разность постоянных распространения в сердцевине и оболочке

$$\Delta\beta = 2\pi \left( n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}} \right) / \lambda = 2\pi \Delta n_{\text{eff}} / \lambda, \quad (3)$$

$n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  – эффективный показатель преломления сердцевин,  $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$  – эффективный показатель преломления оболочки,  $\lambda$  – длина волны излучения,

$L$  – длина отрезка волокна с меньшим диаметром сердцевинки. Провалы в пропускании возникают в соответствии с формулой (1), когда  $\varphi$  принимает значения, кратные  $\pi$ . При этом из соотношения (1) следует, что спектральное положение этих провалов определяется как

$$\lambda_D = 2\Delta n_{\text{eff}}L/(2n + 1), \quad (4)$$

где  $n$  – целое число. Если при изменении температуры  $\Delta n_{\text{eff}}$  меняется на  $\delta n_{\text{eff}}$ , положение провала меняется на

$$\delta\lambda_D \approx 2L\delta n_{\text{eff}}, \quad (5)$$

что может фиксироваться детектором. Формула (5) показывает, что чувствительность такого датчика растет с увеличением длины волокна  $L$  и изменения эффективного показателя преломления оболочки  $\delta n_{\text{eff}}$ . Увеличение длины волокна нарушает компактность датчика. Поэтому в работе [2] было предложено использовать дополнительное резкое сужение волокна для увеличения интенсивности оболочечных мод.

В работах [3, 4] для построения интерферометров Маха–Цендера использовалось лишь сужение единого волокна на определенных участках. При этом в работе [3] исследовалась зависимость характеристик датчиков температуры на основе суженного волокна от длины суженной части, а в работе [4] – зависимость характеристик этих датчиков от толщины суженной части. В этих работах температура определялась по расстоянию между минимумами интерференционной картины. Соотношение для расстояния между минимумами следует из формулы (3) и записывается как

$$\Delta\lambda \approx \lambda^2/(\Delta n_{\text{eff}}L). \quad (6)$$

В формуле (6) от температуры зависят  $\Delta n_{\text{eff}}$  и  $L$ , а  $\Delta\lambda$  тем больше, чем меньше длина суженной части  $L$ . Это и наблюдалось в эксперименте:  $\Delta\lambda$  не зависит от толщины суженной части в явном виде. Однако она влияет на распределение мод, возбуждаемых в оболочке, и существует оптимальная толщина, при которой чувствительность датчика максимальна [4].

При более резком сужении и меньшем радиусе суженной части следует рассматривать суженную часть как многомодовое волокно, в котором суженная оболочка первоначального одномодового волокна играет роль сердцевинки, а роль оболочки – воздух. Область сужения волокна вызывает преобразование моды  $HE_{11}$  в моды  $HE_{1m}$  суженной части волокна. Если при этом сужении можно ограничиться рассмотрением возбуждения лишь моды  $HE_{12}$ , то на второй не цилиндрической области перехода снова в одномодовое волокно проис-

ходит интерференция мод с интенсивностью, описываемой формулами (1), (2), где, однако [5],

$$\Delta\beta = \lambda(U_2^{\infty 2} - U_1^{\infty 2}) / (4\pi n_{\text{clad}} \rho^2) \exp(-2/V), \quad (7)$$

и где в случае мод  $HE_{11}$  и  $HE_{12}$   $U_1^{\infty}$  ( $HE_{11}$ ) = 2.405 и  $U_2^{\infty}$  ( $HE_{12}$ ) = 5.520,  $\rho$  – радиус суженной части волокна,

$$V = 2\pi\rho/\lambda\sqrt{n_{\text{clad}}^2 - n_{\text{ext}}^2}. \quad (8)$$

В этих работах температура определялась по расстоянию между минимумами интерференционной картины. Соотношение для расстояния между минимумами или для так называемого свободного спектрального диапазона следует из вышеприведенных формул и записывается как

$$FSR(\lambda) = 2\pi/(d\varphi/(d\lambda)) = 8\pi^2\rho^2 n_{\text{clad}} / (L(U_2^{\infty 2} - U_1^{\infty 2}) \exp(-2/V)(1 - 2/V)). \quad (9)$$

В формуле (9) от температуры зависят  $\rho$  и  $L$ .  $FSR(\lambda)$  тем больше, чем меньше длина суженной части  $L$ , так же, как и в предыдущем случае,  $FSR(\lambda)$  сложным образом зависит от радиуса суженной части  $\rho$ . Анализ показывает, что оптимальная величина суженной части волокна описывается формулой:

$$\rho_{\text{opt}} = \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \lambda / \left(\pi\sqrt{n_{\text{clad}}^2 - n_{\text{ext}}^2}\right). \quad (10)$$

Датчик показателя преломления на примере исследования соляного раствора рассматривался в работе [5] при  $n_{\text{clad}} = 1.46$  и  $n_{\text{ext}} = 1.37$ .  $\rho_{\text{opt}} \sim 2$  по формуле (9), что соответствует значениям диаметра суженной части волокна, использованным в работе [5].

Таким образом, существуют оптимальные длины и толщины суженной части волоконного интерферометра, при которой чувствительность датчиков максимальна. Далее мы опишем технологию изготовления суженных волокон с повторяемыми параметрами вблизи этих оптимальных значений.

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРОТКИХ СУЖЕННЫХ ВОЛОКОН

Физически изготовление суженного участка волокна представляет собой нагрев локального участка волокна до температуры, при которой вязкость материала волокна снижается настолько, что становится возможным производить растягивание нагретого участка волокна с определенной скоростью.

На сегодня известны прямой и косвенный способы нагрева волокна. Прямой нагрев волокна может осуществляться путем непосредствен-

ного нагрева участка волокна в пламени горячей газовой горелки сфокусированным лазерным лучом или электрической дугой. При косвенном нагреве волокна нагрев участка волокна происходит в разогретой микропечи. Разогрев микропечи производится электроспиралью, либо пламенем газовой горелки.

Каждый из способов имеет свои особенности, преимущества и свои недостатки. Для изготовления участка суженного волокна из исходного оптического кварцевого волокна очень важна температура нагрева, которая должна находиться в определенном диапазоне. С одной стороны, она должна быть достаточно высокой, чтобы иметь достаточную вязкость для вытяжки кварцевого волокна. С другой стороны, она не должна быть слишком высокой, т.к. известно, что при температуре нагрева кварца  $1550^{\circ}\text{C}$  и выше, а затем, последующем его охлаждении, происходит кристаллизация кварца в виде  $\beta$ -модификации. Появление кристаллов  $\beta$ -модификации кварца в волокне, в свою очередь, приводит к существенным оптическим потерям в волокне. Таким образом, нагрев участка кварцевого волокна для вытяжки не должен превышать  $1500^{\circ}\text{C}$ .

Для вытягивания волокна применяют моторизованные подвижки (трансляторы), приспособленные для закрепления на себе кварцевого волокна, способные производить с регулируемой скоростью линейное перемещение, при этом закрепленное и нагретое волокно растягивается. Управление скоростью перемещения происходит по программе через контроллер, при этом скорость не превышает нескольких миллиметров в секунду.

Для создания суженных волокон с минимально коротким участком сужения требуется нагревать минимально короткий участок волокна за короткое время. Из известных способов нагрева подходят два: нагрев с помощью лазерного луча и с помощью искровой дуги. Эти способы позволяют получать нагреваемый участок волокна менее 1 мм, тогда как при других способах участок нагрева начинается от 2–3 мм и больше.

Нагрев с помощью сфокусированного лазерного луча представляется довольно сложным и специфическим в работе. Кроме того, для нагрева кварцевого волокна требуется дорогостоящий мощный инфракрасный лазер и инфракрасная оптика. А нагрев с помощью искровой дуги прост в использовании, недорогой и устройство нагрева практически может быть изготовлено самостоятельно. Изготовление суженных и заостренных волокон при нагреве электроискровым методом известно уже давно [6, 7], однако эта технология до сих пор не достаточно полно исследована.

Существующие в продаже стандартные устройства, использующие для нагрева волокна искровую дугу, применяются только для сварки кварцевых

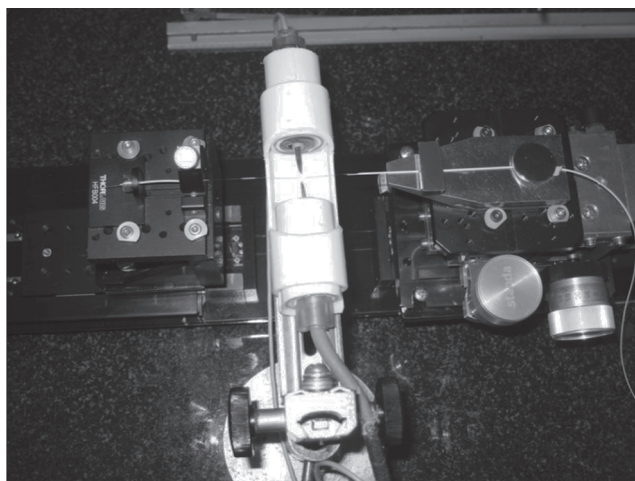


Рис. 1. Установка для изготовления короткого суженного волокна.

оптических волокон. На этих устройствах (сварочниках) искровой дугой оплавливают два конца волокна, подведенных близко к друг к другу, и после оплавления быстро прижимают торцы волокон вместе и таким образом осуществляют сварку. Этот процесс производится в автоматическом режиме, и параметры процесса не подлежат изменению. Кроме того, нам необходимо производить не сжатие, а растягивание волокна. Все эти факторы предопределили самостоятельное изготовление нестандартного устройства, необходимого для изготовления короткого суженного кварцевого оптического волокна.

Изготовленное устройство состоит из двух узлов: узла создания искровой дуги и узла вытяжки волокна. В узле искровой дуги применен в качестве источника питания высоковольтный трансформатор с диодным выпрямителем. Первичная обмотка трансформатора питается от лабораторного трансформатора. Искровая дуга зажигалась между электродами. Расстояние между электродами можно изменять. В качестве электродов использовалась заостренная вольфрамовая проволока диаметром 1 мм и графитовый стержень диаметром 1 мм. Блок с электродами закреплялся в механической подставке с возможностью юстировки по высоте. Узел вытяжки волокон состоит из двух моторизованных трансляторов, двух узлов крепления волокна и трехкоординатного юстировочного узла, собранных в определенной конфигурации на единой жесткой подложке. Управление моторизованными трансляторами осуществлялось по специальной компьютерной программе через контроллеры. Основные элементы узла вытяжки волокна изготовлены фирмой “Standa”.

Общий вид собранного устройства показан на рис. 1. На этом устройстве отрабатывалась технология получения коротких суженных волокон.

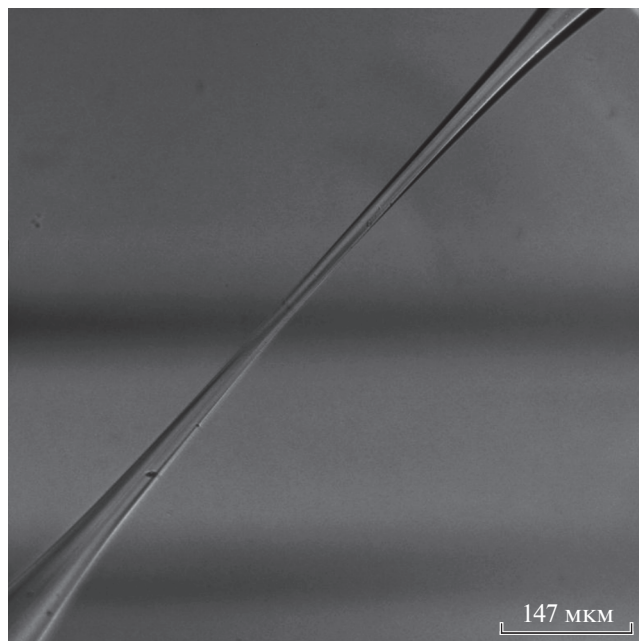


Рис. 2. Внешний вид короткого суженного волокна.

Для поиска оптимального режима получения коротких суженных волокон варьировали следующие параметры процесса: мощность электрической дуги, её расположение относительно волокна и время разогрева кварцевого волокна.

Подобранные в результате работы режимы позволяют на нашем устройстве получать с хорошей повторяемостью волокна (рис. 2) с короткой суженной частью со следующими геометрическими параметрами: длина самой короткой вытянутой часть 2–3 мм и диаметр узкой суженной части 10–15 мкм и с достаточно протяженными суженными частями длиной 10–15 мм и диаметром в узкой части до 1 мкм. Для сравнения, волокна с адиабатической суженной частью и с талией порядка 0.5 мкм имеют длину 80–100 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волокна с короткой областью сужения имеют критические значения параметров (длины сужения и толщины суженной части), оптимальные для датчиков физических величин. Мы определили значения этих параметров для некоторых типов датчиков и разработали технологию изготовления коротких суженных волокон с хорошей повторяемостью результатов. С использованием этой технологии могут быть изготовлены различные волоконные датчики физических величин (например, показателя преломления, температуры, вибраций, электрического поля) для использования в цифровой экономике в качестве чувствительных элементов систем управления.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 18-29-20091 – теория) и темой государственного задания № АААА-А18-118030690040-8 (эксперимент). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП-САЦ ФИЦ КазНЦ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nguyen L.V., Hwang D., Moon S. et al.* // Opt. Expr. 2008. V. 16. № 15. P. 11369.
2. *Shi J., Xiao S., Yi L., Bi M.* // Sensors. 2012. V. 12. № 4. P. 4697.
3. *Musa B., Kamila Y.M., Bakara M.H.A. et al.* // J. Teknol. Sci. Engin. 2016. V. 78. № 3. P. 135.
4. *Yadav T.K., Mustapa M.A., Bakar M.H.A., Mahdi M.A.* // J. Eur. Opt. Soc. Rap. Public. 2014. V. 9. Art. № 14024.
5. *Ji W.B., Liu H.H., Tjin S.C. et al.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 2012. V. 24. № 20. P. 1872.
6. *Kumar A., Pal B.* // Electronics Lett. 1984. V. 20. № 13. P. 534.
7. *Lin H.-N., Lewlomphaisarl U., Chen S.H. et al.* // Rev. Sci. Instr. 1998. V. 69. № 11. P. 3843.