

УДК 681.7.068

ВОЛОКОННАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ ОТРЕЗКА ВОЛОКНА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ КАК ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ И НАТЯЖЕНИЯ

© 2013 И.В. Злодеев¹, О.В. Иванов^{1,2}

¹Ульяновский государственный университет

²Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Поступила в редакцию 26.11.2013

Исследована волоконно-оптическая структура, основанная на преобразовании мод сердцевины и оболочки, связь между которыми происходит на стыке двух волокон, имеющих различные профили показателя преломления. Структура образована вставкой отрезка одномодового волокна SM630 с малой сердцевиной и двойной оболочкой между двумя стандартными волокнами SMF-28. Измерены спектры пропускания предложенной структуры при ее нагревании и натяжении. Получены значения чувствительности 10 пм/°С и $-0,3$ пм/με.

Ключевые слова: оптическое волокно, оболочечные моды, оптоволоконный датчик температуры

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрения новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам постоянно растет потребность в различного рода датчиках и сенсорных системах. Среди различных решений для систем мониторинга большое внимание привлекают волоконно-оптические датчики [1]. Подобные устройства имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными аналогами, например, независимость от электрических и магнитных полей, возможность использования в агрессивных химических средах, в условиях с повышенным уровнем пожарной и взрывоопасности и т.д.

Среди сенсорных элементов, разрабатываемых для волоконно-оптических датчиков перспективными представляются волоконные структуры, принцип действия которых основан на взаимодействии и преобразовании оболочечных мод [2, 3] в связи с простотой их изготовления и широким спектром возможного применения. К таким структурам относятся длиннопериодные решетки, связывающие однонаправленные моды; брэгговские решетки [4], возбуждающие встречно направленные моды; интерферометры, основанные на интерференции основной моды сердцевины с одной или несколькими модами оболочки [5, 6], и другие. Перечисленные волоконные структуры могут найти различные применения в качестве оптических фильтров и датчиков различных физических

параметров, в частности, натяжения [7, 8], температуры [9], давления, изгиба, показателя преломления внешней среды [10].

Для возбуждения оболочечной моды, ей необходимо передать энергию из основной моды, для чего в волокне должен быть создан некоторый дефект: длиннопериодная решетка, стык двух волокон с несогласованными профилями мод сердцевины, стык стандартного волокна с микроструктурированным, в котором также могут распространяться моды высших порядков, схлопывание отверстий дырчатого волокна и т.п.

Ранее нами была предложена структура, состоящая из отрезка волокна SM630 с двойной оболочкой и малой сердцевиной, заключенного между двумя отрезками стандартного волокна SMF-28 [11]. Волокно-вставка имеет сердцевину, диаметр которой меньше диаметра сердцевины стандартного волокна, и является одномодовым на длинах волн выше 612 нм. В спектрах пропускания предложенной структуры экспериментально были обнаружены провалы, положение которых не зависит от длины отрезка волокна-вставки. Причины их образования рассмотрены в работе [12]. Ранее нами было исследовано влияние на спектр пропускания структуры изгиба волокна-вставки и показателя преломления внешней среды [13]. Настоящая работа посвящена изучению влияния температуры и натяжения волокна-вставки на спектр пропускания предложенной структуры.

ВОЛОКОННАЯ СТРУКТУРА

Исследуемая в работе волоконно-оптическая структура образована вставкой отрезка волокна SM630 фирмы 3M Specialty Optical Fibre между двумя отрезками стандартного волокна SMF-28 ($r_{co} = 4.2$ мкм, $\Delta = 0.36\%$, $NA = 0.14\%$,

Злодеев Иван Владимирович, аспирант, инженер лаборатории твердотельной электроники.

E-mail: stygwaar@yandex.ru

Иванов Олег Витальевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: olegivvit@yandex.ru

$\lambda_{\text{cutoff}} = 1260$ нм). Для соединения оптических волокон используется обычный сварочный аппарат.

Волокно SM630, используемое в качестве вставки, как показали измерения его профиля показателя преломления (рис. 1) имеет внутреннюю оболочку с показателем преломления n_{inn} ниже показателя преломления внешней оболочки n_{cl} : $n_{\text{cl}} - n_{\text{inn}} = 0.0043$. Радиус внутренней оболочки составляет 25 мкм. Сердцевина волокна имеет диаметр более чем вдвое меньший диаметра стандартного волокна: $r_{\text{co}} = 1.8$ мкм. Разница между показателями преломления сердцевины n_{co} и внутренней оболочки составляет $n_{\text{co}} - n_{\text{inn}} = 0.0054$.

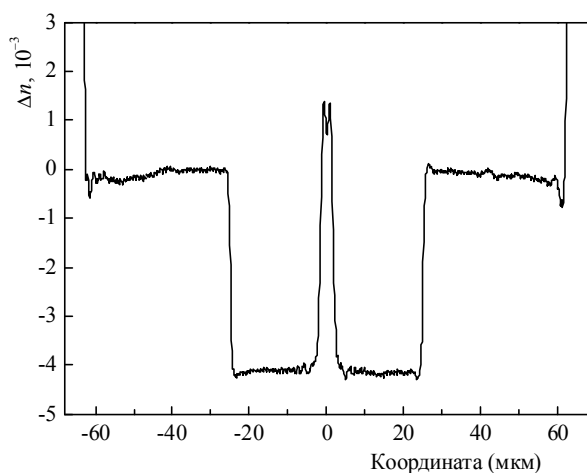


Рис. 1. Профиль показателя преломления волокна SM630

На первом стыке волокон SMF-28 и SM630 имеющих различные параметры сердцевины, мощность из моды сердцевины волокна SMF-28 распределяется между модами второго волокна, вследствие того, что профили мод двух волокон различны. От первого стыка моды распространяются по отрезку волокна SM630 ко второму стыку. Часть энергии рассеивается в результате передачи ее части модам высоких порядков и потерь на поверхности волокна. На втором стыке моды волокна SM630 преобразуются в моду сердцевины волокна SMF-28 и могут интерферировать друг с другом. Также на втором стыке часть излучения попадает в оболочку волокна SMF-28, где теряется, не возвращаясь в его сердцевину. Схема распространения излучения в структуре представлена на рис. 2.

Огибающая спектра пропускания описанной структуры имеет два широких провала: один, шириной около 30 нм расположен, на длине волны 1185 нм, второй – шириной около 50 нм, расположен на длине волны около 1450 нм. Положение и ширина провалов не зависят от длины волокна вставки, что указывает на неинтерференционное

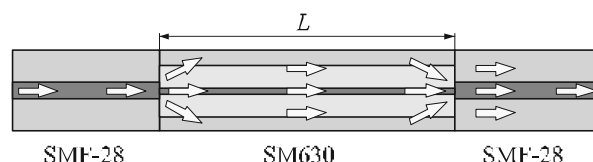


Рис. 2. Схема распространения световых лучей в волоконной структуре

происхождение этих двух провалов. При окрашивании волокна-вставки черной краской спектр пропускания структуры становится более гладким, без многочисленных осцилляций. При этом провал на длине волны 1185 нм становится более гладким и четким, а провал на длине волны 1450 нм размывается в широкую полосу поглощения от 1350 до 1700 нм (рис. 3).

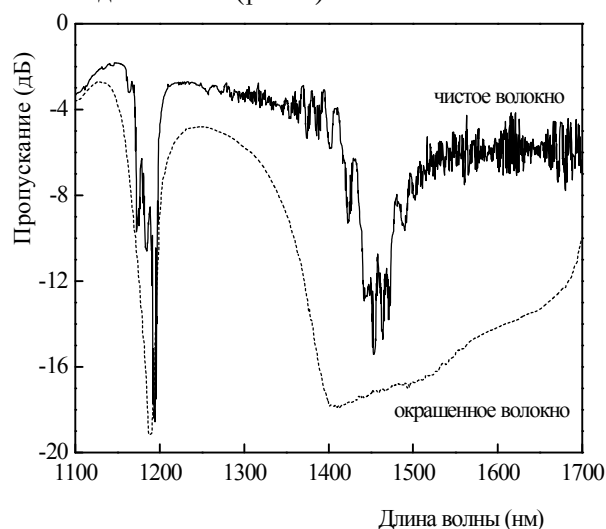


Рис. 3. Спектры структуры с зачищенным от полимерного покрытия волокном (сплошная линия) и с окрашенным волокном (пунктирная линия)

НАГРЕВ СТРУКТУРЫ

Для исследования зависимости спектра пропускания структуры от температуры нами была собрана следующая волоконная схема: отрезок волокна-вставки, с приваренными с двух его сторон стандартными волокнами, был зафиксирован между двумя держателями и помещен в цилиндрический нагреватель. При этом по возможности были исключены деформации структуры, такие, например, как изгиб или скрутка вдоль продольной оси волокна. В волокно SMF-28 с одной стороны вводилось излучение от широкополосного источника света; волокно с другой стороны направляло излучение, прошедшее через структуру, в спектроанализатор. Измерение температуры внутри нагревателя производилось с помощью термопары.

Структура нагревалась от комнатной температуры до 300°C. Изменение спектра пропускания при нагревании представлено на рис. 4. На-

блюдается смещение всего спектра в область больших длин волн, при этом в целом его форма не изменяется. На рис. 4б представлено смещение одного из интерференционных пиков. Максимальный наблюдаемый сдвиг спектра при нагреве до 300 °С составил 3 нм. При уменьшении температуры структуры ее спектр смещается в обратном направлении, а после полного охлаждения ее спектр принимает первоначальный вид.

На рис. 5 представлена зависимость сдвига спектра от температуры. Черные точки показывают смещение спектра при нагреве, белые – при охлаждении. Зависимость близка к линейной, с незначительным отклонением от линейности в области высоких температур. Из рисунка видно, что температурная чувствительность структуры составляет около 10 пм/°С, что меньше чувствительности длиннопериодных волоконных решеток (20–60 пм/°С) и близко к чувствительности брэгговских решеток (13,7 пм/°С).

НАТЯЖЕНИЕ СТРУКТУРЫ

Для исследования чувствительности структуры к натяжению использовалась следующая схема: структура со вставкой волокна SM630

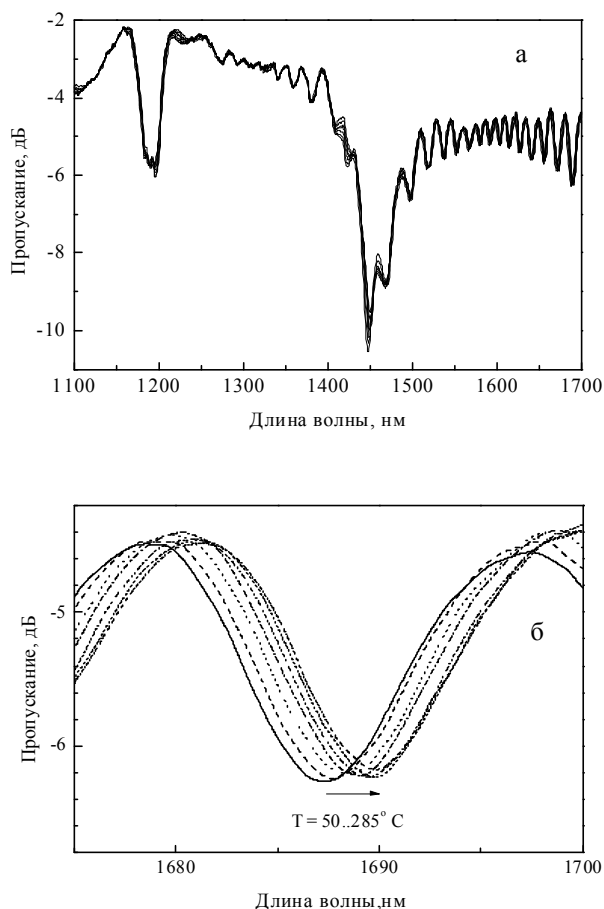


Рис. 4. Спектр пропускания структуры при нагревании до 300 °С (а); смещение отдельного интерференционного пика при нагревании (б)

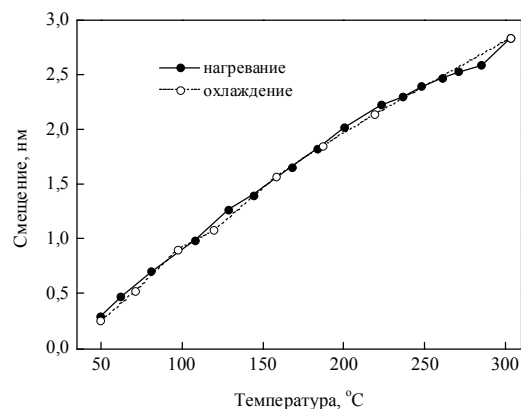


Рис. 5. Зависимость смещения спектра структуры от температуры

была жестко закреплена между неподвижным держателем и транслятором с микрометрическим винтом с ценой деления 1 мкм и подключена к широкополосному источнику и спектроанализатору. Отрезок волокна-вставки был очищен от оболочки и покрыт черной краской, чтобы исключить из спектра осцилляции, вызванные интерференцией мод высших порядков.

Эволюция спектра пропускания при натяжении представлена на рис. 6. Из рисунка видно, что при натяжении структуры происходит увеличение глубины основного провала, при этом его минимум смещается в сторону коротких длин волн. При этом зависимость положения провала от натяжения имеет линейный характер (рис. 7). Чувствительность структуры к натяжению составила –0,3 пм/ме. Таким образом, чувствительность исследуемой структуры близка к чувствительности длиннопериодных волоконных решеток, индуцируемых в электрической дуге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено исследование волоконной структуры на основе волокна SM630 с двойной оболочкой к натяжению и нагреву. Экспериментально установлено, что зависимость сдвига спектра пропускания исследуемой волоконной структуры от температуры при нагреве до 300 °С близка к линейной с температурным коэффициентом 10 пм/°С. При охлаждении структуры ее спектр возвращается в исходное состояние.

Исследование влияния натяжения на спектр пропускания структуры показало, что зависимость сдвига основного провала от натяжения также имеет линейный характер. Чувствительность структуры к натяжению составила –0,3 пм/με.

Таким образом, показано, что предложенная волоконная структура демонстрирует чувствительность к натяжению и температуре и, поэтому, может быть использована в качестве сенсорного элемента соответствующих волоконно-оптических датчиков.

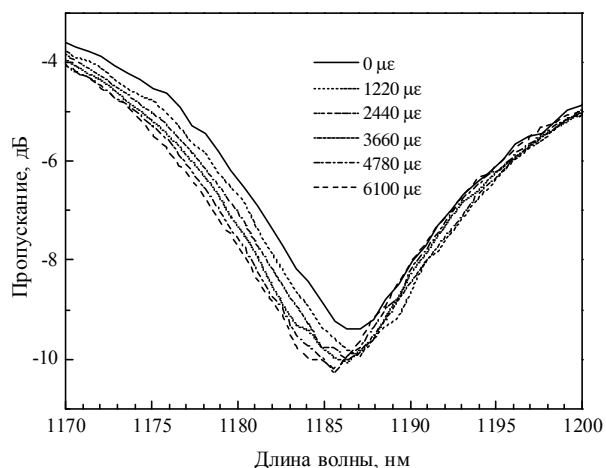


Рис. 6. Эволюция спектра пропускания структуры при натяжении

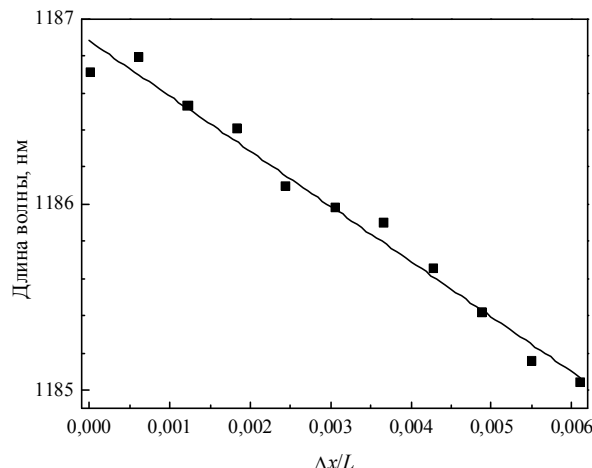


Рис. 7. Зависимость положения провала в спектре пропускания структуры от натяжения

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Лихачева Е.М. и ИЦВО РАН за проведенные измерения профиля показателя преломления волокна SM630.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 12-02-97034-р_поволжье_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
2. Иванов О.В., Никитов С.А., Гуляев Ю.В. Оболочечные моды волоконных световодов и их применение // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. №2. С. 175-202.
3. Иванов О.В., Никитов С.А. Оболочечные моды волоконных световодов и длиннопериодные волоконные решетки. М.: Физматлит, 2012. 252 с.
4. Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters // J. Opt. Soc. Am. A, 1997, V. 14, p. 1760-1773; errata, 2000, V. 17, N. 11, p. 2113.
5. Nguyen I.V., Hwang D., Moon D.S., Chung Y. Tunable comb-filter using Thermally Expanded Core fiber and Ytterbium doped fiber and its application to multiwavelength fiber laser // Opt. Comm., 2008, V. 281, N. 23, 5793-5796

6. Dianov E.V., Vasiliev S.A., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Protopopov V.N. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings // European Conf. on Opt. Comm.'96, 1996, p. 65-68
7. Liu Y., Wei L. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers // Appl. Opt., 2007, V.46., p. 2516-2519
8. Kumar D., Sengupta S., Ghorai S.K. Distributed strain measurement using modal interference in a birefringent optical fiber // Meas. Sc. And Tech., 2008, V.19, Art no. 065201
9. Chen T.-J. Use of liquid-crystal-clad fiber as modal filter for two-mode fiber-optic interferometer // Opt. Lett., 2004, V. 29, p. 2852-2854
10. Pang F., Liu H., Chen N., Lu Y., Zeng X., Chen Z., Wang T. Cladding-modes resonance of a double-cladding fiber at a near modal cut-off wavelength for RI sensing // Meas. Sc. And Tech., 2010, V. 21. art no. 094028
11. Ivanov O.V. Fibre –optic interferometer formed by a section of small-core fibre spliced between standart fibres // Optics Communications, 2009, 282, P. 3895-3898
12. Злодеев И.В., Иванов О.В. Спектры пропускания структуры на основе отрезка волокна с двойной оболочкой при изгибе // Квантовая Электроника. 2013. Т. 43. №6. С.535-541
13. Злодеев И.В., Иванов О.В. Исследования применения волоконных структур на основе отрезка волокна с двойной оболочкой в качестве датчиков изгиба и показателя преломления // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14. №4(4). С.1068-1073.

THE FIBER STRUCTURE ON THE BASIS OF THE SEGMENT DOUBLE-CLAD FIBER AS A TEMPERATURE SENSOR AND A TENSION

© 2013 I.V. Zlodeev¹, O.V. Ivanov^{1,2}

¹ Ulyanovsk State University

² Ulyanovsk Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov, RAS

Investigated optical fiber structure based on the transformation of core and cladding modes, the relationship between them occurs at the junction of two fibers with different refractive index profiles. Structure is formed by inserting a segment of single-mode fiber with a small core SM630 and double-clad fibers between two standard SMF-28. Measured transmission spectra of the proposed structure as it is heated and tension. The values of sensitivity of 10 pm / oC and pm / με.

Keywords: optical fiber cladding modes, fiber optic temperature sensor.

Ivan Zlodeev, Graduate Student, Engineer at the Solid Electronics Laboratory. E-mail: stygwaar@yandex.ru

Oleg Ivanov, Doctor of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow. E-mail: olegivvit@yandex.ru