

УДК 681.7.068

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОТРЕЗКА ВОЛОКНА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКОВ ИЗГИБА И ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

© 2012 И.В. Злодеев<sup>1</sup>, О.В. Иванов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский государственный университет

<sup>2</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Поступила в редакцию 20.11.2012

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 изгибе отрезка волокна SM630. Обнаружено смещение резонансов в длинноволновую область при увеличении кривизны волокна. Исследована зависимость смещения от длины волокна вставки, ориентации его изгиба, типа подводящего волокна и показателя преломления внешней среды.

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

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием автоматизированных систем контроля и производства в последние десятилетия постоянно растет потребность в датчиках различных физических параметров. Одним из направлений развития сенсорных устройств являются волоконно-оптические датчики [1]. В связи с особенностями конструкции подобные устройства имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными электронными и оптоэлектронными аналогами: независимость от электрических и магнитных полей, возможность использования в химически агрессивных, а также пожаро- и взрывоопасных средах.

Среди волоконных сенсорных элементов, в связи с простой изготовления и высокой чувствительностью к внешним параметрам, интерес привлекают структуры основанные на взаимодействии и преобразовании оболочечных мод [2, 3]. Примерами подобных структур являются длиннопериодные волоконные решетки, брэгговские решетки [4], интерферометры [5], основанные на взаимодействии моды сердцевины с одной или несколькими модами оболочки. Для возбуждения оболочечных мод посредством передачи энергии основной моды в волокне должен быть создан некоторый дефект: изменение показателя преломления, стык двух волокон с несогласованными про-

*Злодеев Иван Владимирович, аспирант, инженер лаборатории твердотельной электроники научно-исследовательского технологического института.*

*E-mail: stygwaaar@yandex.ru*

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

*E-mail: olegivvit@yandex.ru*

филями мод сердцевины, тэйперы и другие [6].

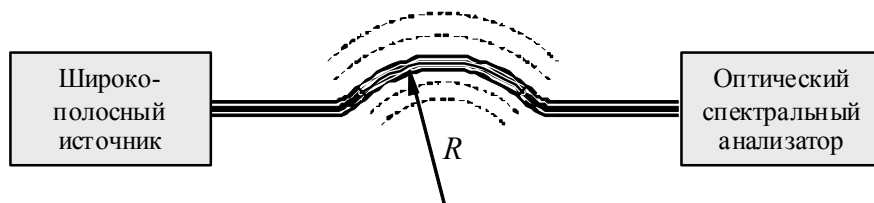
Большинство из указанных волоконных структур проявляют чувствительность к изгибу [7]. Эти структуры отличаются по механизмам чувствительности, по величине измеряемых изгибов, по способам измерения изгиба.

Другой особенностью волоконно-оптических структур, в которых распространяются оболочечные моды, является их чувствительность к показателю преломления среды, окружающей волокно [7, 8]. Это обусловлено тем, что профиль оболочечных мод распространяется вплоть до границы оболочки в внешней средой и незначительная часть поля проникает в эту среду.

Ранее нами была предложена структура, основанная на вставке отрезка волокна с двойной оболочкой и малой сердцевиной между двумя отрезками стандартного волокна [9]. В спектрах пропускания структуры экспериментально были обнаружены провалы, положение которых не зависит от длины отрезка волокна. В настоящей работе исследуется изменение спектров пропускания данной структуры при изгибе волокна-вставки, а также при изменении показателя преломления внешней среды.

### 1. ОПТОВОЛОКОННАЯ 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,  $\Delta = 0.36\%$ ,  $NA=0.14$ ,  $\lambda_{cutoff} = 1260$  нм). Для соединения оптических волокон используется обычный автоматический сварочный аппарат.



**Рис. 1.** Волоконно-оптическая схема, используемая в эксперименте по измерению чувствительности структуры к изгибу

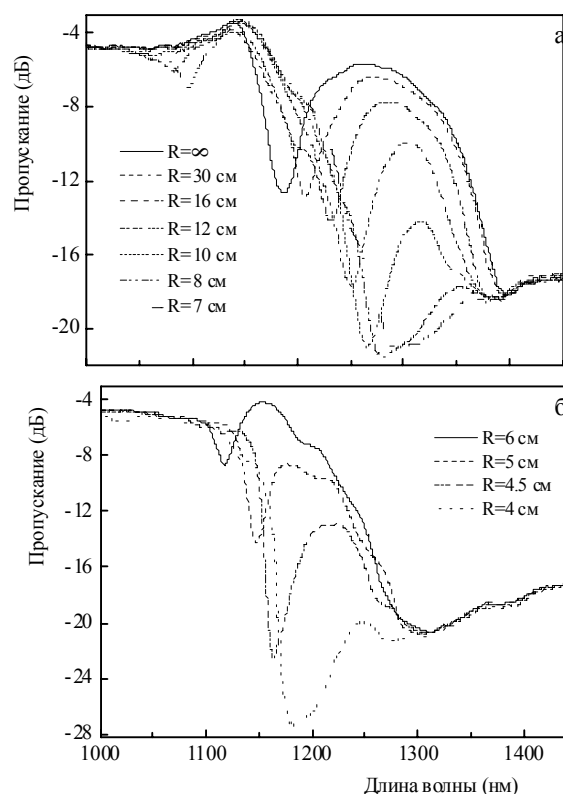
Волокно SM630, используемое в качестве вставки, как показали измерения его профиля показателя преломления (рис. 1), имеет внутреннюю оболочку с показателем преломления  $n_{inn}$  ниже показателя преломления внешней оболочки  $n_{cl}$ :  $n_{cl} - n_{inn} = 0.0043$ . Радиус внутренней оболочки составляет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

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.

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

## 2. СТРУКТУРА С ИЗГИБОМ

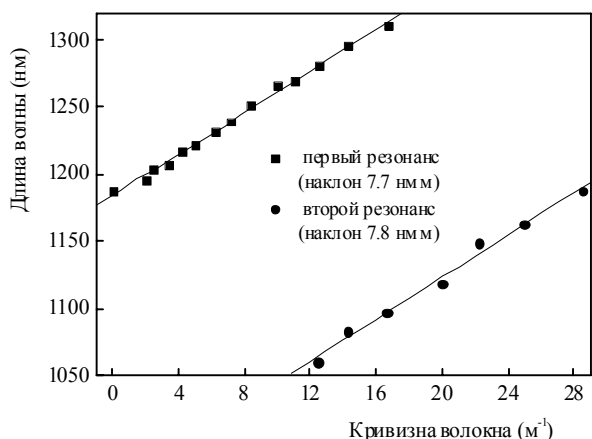
Для выяснения чувствительности структуры к изгибу были проведены измерения эволюции



**Рис. 2.** Спектры структуры длиной 22.5 см при изменении радиуса кривизны волокна от бесконечности до 7 см (а) и от 6 до 4.5 см (б)

спектра пропускания при увеличении кривизны волокна. Изгиб структуры с фиксированным радиусом кривизны производился ее размещением вдоль начерченной на плоскости линии, как показано на рис. 1. Измеренные спектры структуры с отрезком волокна длиной 22,5 см показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, в спектре структуры без изгиба присутствует четко выраженный основной провал на длине волны 1185 нм. При увеличении кривизны волокна этот провал смещается в длинноволновую область и его глубина растет. Спектр пропускания в области длин волн выше 1400 нм остается практически без изменений.

При радиусах кривизны волокна меньше 10 см в коротковолновой части спектра появляется новый провал. На рис. 2б показана эволюция спектров пропускания при уменьшении радиуса кривизны от 6 до 4.5 см. Амплитуда нового провала растет, и он также как и первый провал



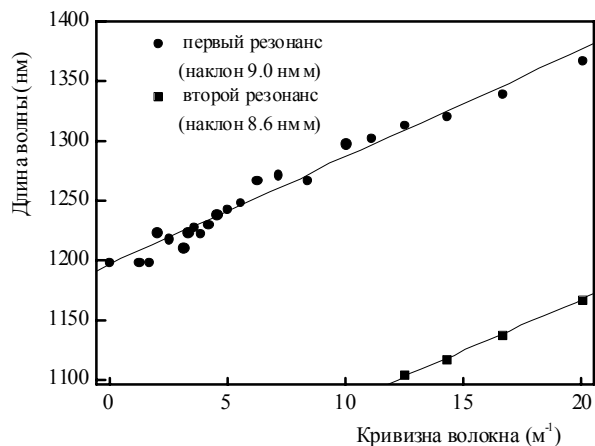
**Рис. 3.** Изменение двух резонансных длин волн структуры длиной 22.5 см при увеличении радиуса кривизны волокна

смещается в сторону больших длин волн.

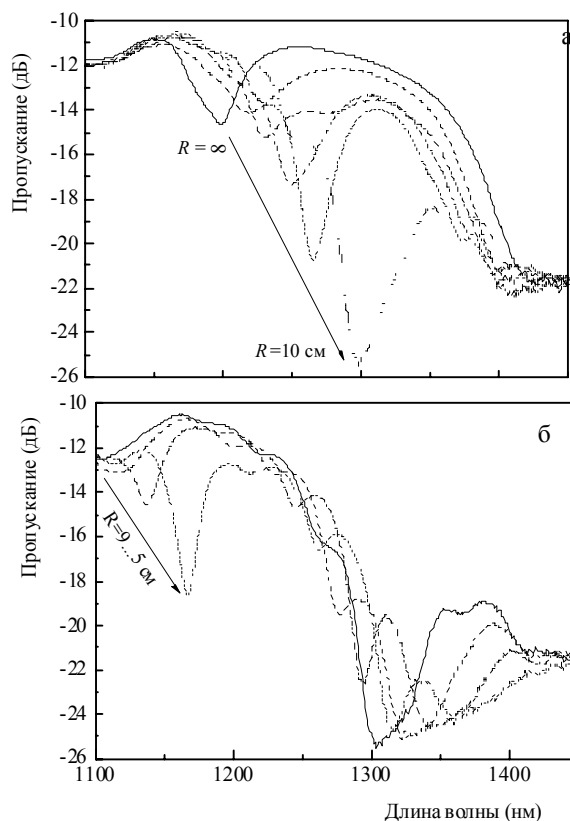
На рис. 3 показаны зависимости длин волн двух провалов в спектре пропускания структуры в зависимости от кривизны волокна. Из рисунка видно, что зависимости близки к линейным, а наклоны соответствующих аппроксимационных кривых практически совпадают.

Для того чтобы проверить зависимость чувствительность исследуемой структуры к изгибу от ее длины, были проведены измерения, аналогичные уже выполненным, с меньшими длинами волокна SM630. Для этого волоконная схема разрывалась в месте сварки, волокно с малой сердцевинной укорачивалось на несколько сантиметров и снова сваривалось со стандартным волокном.

Спектры структур меньших длин проявляют те же особенности, что и спектры интерферометра начальной длины. На тех же длинах волн наблюдаются широкие провалы, положение которых не зависит от длины интерферометра. Амплитуда провалов уменьшается для структур меньшей длины (рис. 4). При малых радиусах кривизны, как и ранее, появляется и увеличива-



**Рис. 5.** Изменение двух резонансных длин волн структуры длиной 9.5 см при увеличении радиуса кривизны волокна



**Рис. 4.** Спектры структуры длиной 9.5 см при изменении радиуса кривизны волокна от бесконечности до 10 см (а) и от 9 до 5 см (б)

ется провал, сдвигающийся в наблюдаемый диапазон с коротких длин волн (рис. 4б). Как показано на рис. 5, сдвиг длины волны в зависимости от кривизны для структуры, которая в 2.4 раза короче начальной, совсем незначительно (на 12%) больше, чем сдвиг в спектре начальной структуры. Таким образом, чувствительность к изгибу слабо зависит от длины волокна-вставки.

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ИЗГИБА

Один из возможных механизмов сдвига провалов в спектрах при изгибе волокна – это деформация сжатия или растяжения сердцевинки в случае, когда сердцевина изначально была смещена относительно центральной оси волокна. Такое смещение происходит при нецентросимметричности структуры волокна, которая возникла вследствие, например, неточности процесса изготовления. В этом случае знак деформации (сжатие или растяжение) определяется направлением изгиба волокна по отношению к направлению смещения сердцевинки, а спектры пропускания должны зависеть от ориентации изгиба волокна. Асимметрия структуры также может возникнуть в случае несимметричной внутрен-

ней оболочки или когда сварка волокон происходит с их смещением друг относительно друга.

Чтобы выявить возможную асимметрию волокна в структуре, мы исследовали зависимость спектра пропускания структуры от направления изгиба. Для этого отрезок волокна с малой сердцевиной был закреплен на плоскости вдоль дуги окружности с радиусом 13 см. При закреплении мы постарались устранить возможное скручивание волокна. Вблизи мест сварки на волокне были закреплены бумажные указатели, позволяющие регистрировать угол поворота волокна. Затем волокно поворачивалась вокруг своей оси с шагом 90°, тем самым изменялось направление изгиба по отношению ориентации волокна. Полученные для различных углов поворота спектры пропускания структуры практически не зависят от направления изгиба волокна. Положение провала сохраняется на одной и той же длине волны с постоянным сдвигом около 80 нм по отношению к положению провала в неизогнутом волокне. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что эффект сдвига провала не связан с асимметрией структуры волокна или мест сварки.

Сдвиг длины волны провала обусловлен, по видимому, изменением постоянной распространения оболочечной моды при изгибе волокна. Вследствие фотоупругого эффекта при изгибе волокна происходит неоднородное изменение показателя преломления как в сердцевине, так и в оболочке волокна. Амплитуда этого изменения зависит прямопропорционально расстоянию от оси изгиба волокна, поэтому мала в области сердцевины и максимальна на поверхности волокна. В результате этого наиболее сильному влиянию изгиба подвержены моды оболочки. Изменение профиля показателя преломления волокна приводит к смещению профилей оболочечных мод и изменению их постоянных распространения. В результате изменения постоянных распространения мод происходит смещение наблюдаемого провала в изогнутом волокне.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Для исследования влияние показателя преломления на спектр пропускания структуры нами

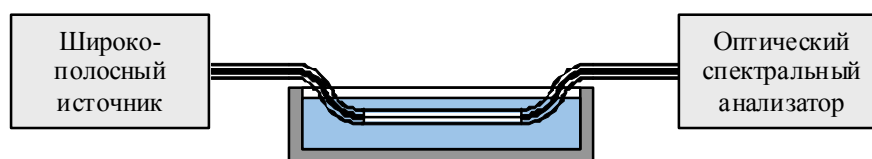


Рис. 7. Волоконно-оптическая схема, используемая в эксперименте по измерению чувствительности структуры к показателю преломления внешней среды

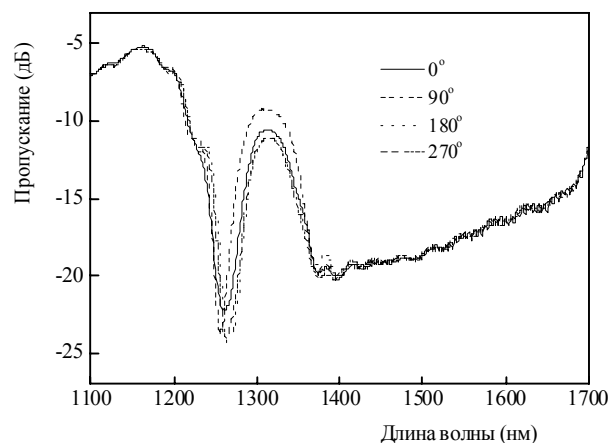


Рис. 6. Спектры структуры длиной 18 см, искривленной по дуге с радиусом кривизны 13 см, в зависимости от направления изгиба волокна

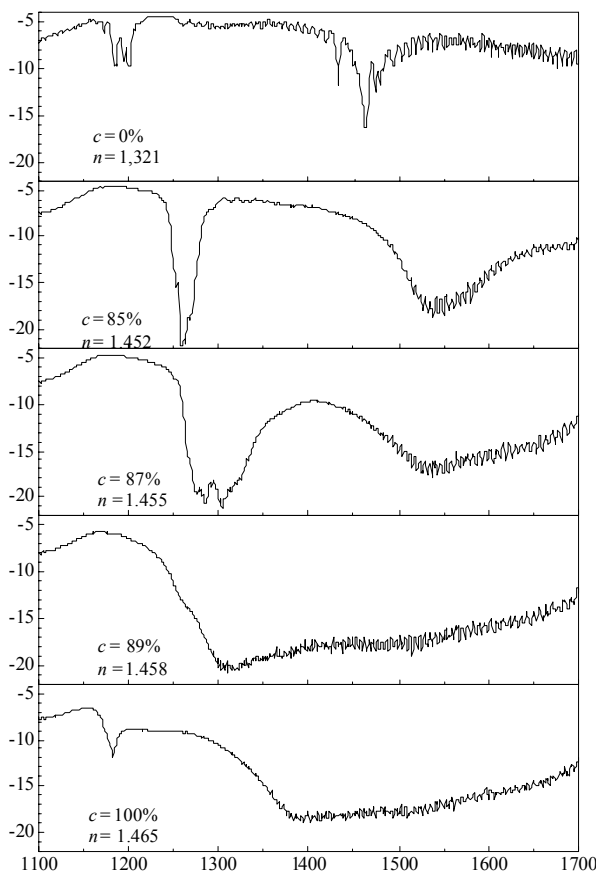
был проведен следующий эксперимент: для исключения возможности деформации структуры она закреплялась на держателе, после чего держатель помещался в кювету с глицерином (рис. 7). После измерения спектра пропускания глицерин постепенно разбавлялся водой, при этом также снимались спектры пропускания структуры. Результаты эксперимента приведены на рис. 8.

Как видно из рисунка, при увеличении показателя преломления внешней среды до показателя преломления кварца происходит сдвиг провалов в спектре пропускания структуры в область больших длин волн. При этом амплитуда первого провала уменьшается, а второй провал размывается в широкую полосу поглощения.

Для показателей преломления выше показателя преломления кварца смещение становится отрицательным и почти не зависит от величины показателя преломления.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, измерены спектры пропускания при изгибе волоконной структуры, основанной на вставке отрезка волокна SM630 с двойной оболочкой между стандартными волокнами SMF-28. Показано, что при увеличении кривизны отрезка волокна происходит смещение провалов в спектрах в длинноволновую область с одновременным увеличением их амплитуды.

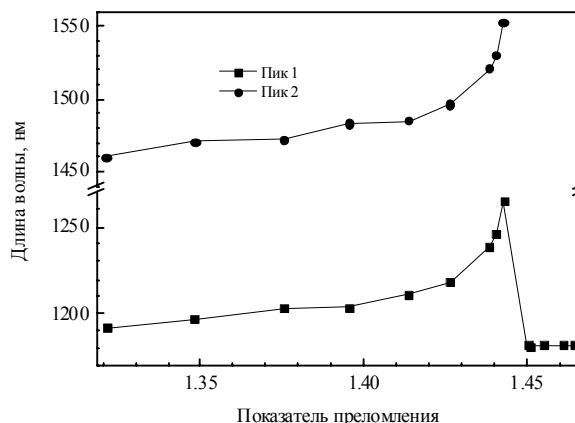


**Рис. 8.** Эволюция спектров пропускания структуры при изменении концентрации раствора и, соответственно, показателя преломления внешней среды

Скорость смещения провала при увеличении кривизны слабо зависит от длины волокна вставки. Изменение направления изгиба волокна-вставки практически не влияет на спектр пропускания структуры, что указывает на то, что механизм сдвига провалов не связан с возможной асимметрией волокна или места сварки. Также продемонстрировано, что положение и смещение провалов не зависит от типа (длины волны отсечки) подводящего волокна.

Показано, что исследуемая структура чувствительна к показателю преломления внешней среды. При увеличении показателя преломления внешней среды до показателя преломления кварца происходит сдвиг провалов в спектре пропускания структуры в область больших длин волн. Для показателей преломления выше этого значения смещение становится отрицательным и почти не зависит от величины показателя преломления.

Обнаруженное смещение провалов в спектрах пропускания может быть использовано при создании оптоволоконного датчика изгиба, отличающегося от датчиков на основе фотоиндуцированных решеток высокой температурной и радиаци-



**Рис. 9.** Спектры пропускания структуры в зависимости от диэлектрической проницаемости внешней среды

онной стойкостью, совпадающей со стойкостью самих оптических волокон, использованных при создании такого датчика.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 - 2013 годы» и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

### 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 L.V., Hwang D., Moon D.S., Chung Y. Tunable comb-filter using Thermally Expanded Core fiber and Ytterbium doped fiber and its application to multi-wavelength fiber laser // Opt. Commun., 281 (23), 5793-5796, (2008).
6. Nishiyama M., Sasaki H., Watanabe K. A deformationsensitive pad-structure embedded with hetero-core optic fiber sensors // Sensors and Actuators A: Physical, V. 136, Issue 1, 1 May 2007, Pages 205-211.
7. James S.W., Tatam R.P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application // Meas. Sci. Technol., 2003, V.14, N 5, p. R49-R61.
8. Seki A., Katakura H., Kai T., Iga M., Watanabe K. // A hetero-core structured fiber optic pH sensor, Analytica

- Chimica Acta 582 (2007) 154–157. section of small-core fibre spliced between standart fibres  
9. *Ivanov O.V.* Fibre –optic interferometer formed by a // Optics Communications, 2009, 282, P. 3895-3898.

## INVESTIGATION OF APPLICATION OF FIBER STRUCTURES BASED ON A SECTION OF DOUBLE-CLADDING FIBER FOR BEND AND REFRACTIVE INDEX SENSING

© 2012 I.V. Zlodeev<sup>1</sup>, O.V. Ivanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk State University

<sup>2</sup>Ulyanovsk branch of Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics, RAS

A fiber optic structure based on transformation of core and cladding modes coupled at a splice of two fibers having different refractive index profiles is investigated. The structure is formed by splicing a section of double-cladding fiber with small core (SM630) between two standard fibers SMF-28. The transmission spectra of the proposed structure under bending are measured. A shift of resonances to longer wavelengths with increasing curvature was observed. The dependences of the shift on the fiber section length, bending orientation, and refractive index of the external medium are investigated.

Keywords: optical fiber, cladding modes, fiber bend sensor

---

*Ivan Zlodeev, Graduate Student, Ulyanovsk State University,  
Engineer at the Solid Electronics Laboratory.*

*Email: stygwaar@yandex.ru*

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