

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОД В ВОЛОКОННОЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ОТРЕЗКА ВОЛОКНА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

© 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

Исследуется взаимодействие мод в волоконно-оптической структуре, основанной на вставке волокна SM630, имеющего двойную оболочку и малую сердцевину. С использованием модового анализа объясняется механизм образования провалов, наблюдаемых в спектрах пропускания структуры. Показано, что образование провалов происходит на длинах волн, соответствующих сближению постоянных распространения двух мод волокна.

Ключевые слова: оптическое волокно, оболочечные моды, волокно с двойной оболочкой

### ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические датчики имеют ряд преимуществ по сравнению с полупроводниковыми и оптоэлектронными аналогами, поэтому в настоящее время наблюдается большой интерес к их исследованию. Среди преимуществ можно выделить независимость измерений от электрических и магнитных полей, возможность использования в агрессивных химических средах, в условиях с повышенным уровнем пожарной и взрывоопасности и другие.

Перспективными для использования в волоконно-оптических датчиках являются волоконные структуры, принцип действия которых основан на взаимодействии и преобразовании оболочечных мод, в связи с простотой их изготовления и широким спектром возможного применения [1]. К таким структурам относятся длиннопериодные решетки, связывающие однонаправленные моды; брэгговские решетки, возбуждающие встречно направленные моды; интерферометры, основанные на интерференции основной моды сердцевины с одной или несколькими модами оболочки [2, 3]; и другие. Перечисленные волоконные структуры могут найти различные применения в качестве датчиков различных физических параметров, в частности, натяжения [4, 5], температуры [6], давления, изгиба [7], показателя преломления внешней среды [8].

Для возбуждения моды оболочки необходимо передать ей энергию из основной моды, для

чего в волокне должен быть создан некоторый дефект: длиннопериодная решетка [9], стык двух волокон с несогласованными профилями мод сердцевины [3, 10], стык стандартного волокна и микроструктурированного [11], в котором также могут распространяться моды высших порядков [12], схлопывание отверстий дырчатого волокна [13] и т.п.

Ранее нами была предложена структура, состоящая из отрезка волокна SM630 с малой сердцевиной и двойной оболочкой, заключенного между стандартными волокнами SMF-28 [10]. Отрезок волокна-вставки имеет сердцевину, диаметр которой меньше диаметра стандартного волокна, и является одномодовым на длинах волн свыше 612 нм. В спектрах пропускания предложенной структуры экспериментально были обнаружены интерференционные пики, наличие которых было описано теоретически, а также широкие провалы. Настоящая работа посвящена исследованию причин появления указанных провалов. Для этого проводится анализ модовой структуры волокна SM630 с двойной оболочкой на различных длинах волн.

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

Волокно SM630, используемое в качестве вставки, как показали измерения его профиля показателя преломления (рис. 1), имеет внутреннюю оболочку с показателем преломления  $n_{inn}$

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

*E-mail: stygvaar@yandex.ru*

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

*E-mail: olegivvit@yandex.ru*

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  $n_{co} - n_{inn} = 0.0054$ . Малый радиус сердцевины волокна SM630 обусловлен тем, что рабочая длина волны этого волокна – 630 нм ( $\lambda_{cutoff} = 612$  нм). В данной работе структура на основе отрезка волокна SM630 исследуется в диапазоне длин волн 1100–1700 нм, на которых сердцевина указанного размера удерживает моды достаточно слабо.

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 серд-

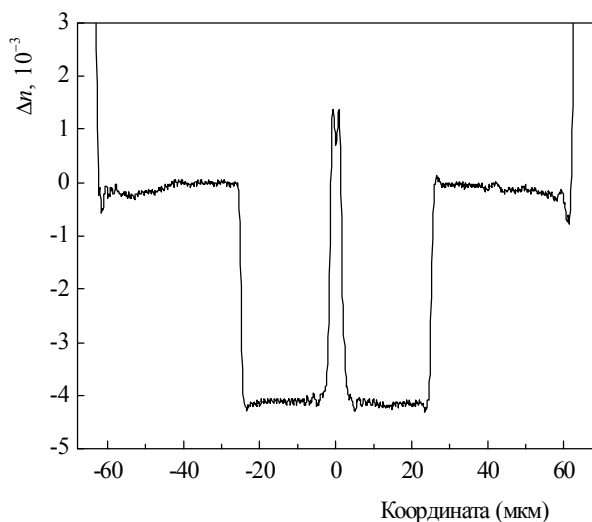


Рис. 1. Профиль показателя преломления в волокне SM630

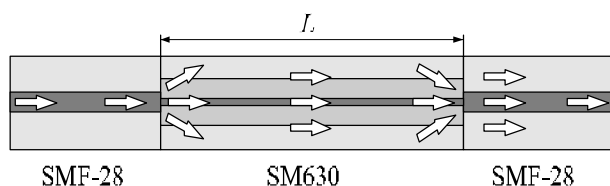


Рис. 2. Схема распространения световых лучей в волоконной структуре

цевину. Ход световых лучей в созданной структуре показан на рис. 2.

Спектр пропускания описанной структуры (рис. 3, сплошная кривая) содержит нерегулярные осцилляции, средний период которых по длине волны, как было показано ранее [10], зависит обратно пропорционально длине интерферометра. Эти осцилляции обусловлены интерференцией моды сердцевины и мод оболочки. При этом огибающая спектра 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.

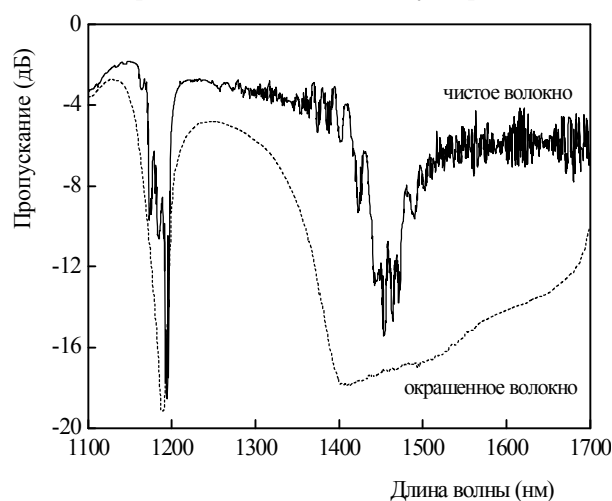


Рис. 3. Спектры структуры с зачищенным от полимерного покрытия волокном (сплошная линия) и с окрашенным волокном (пунктирная линия)

При окрашивании волокна-вставки черной краской спектр пропускания структуры становится более гладким, без многочисленных осцилляций (см. рис. 3, пунктирная кривая). 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. МОДЫ ВОЛОКНА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

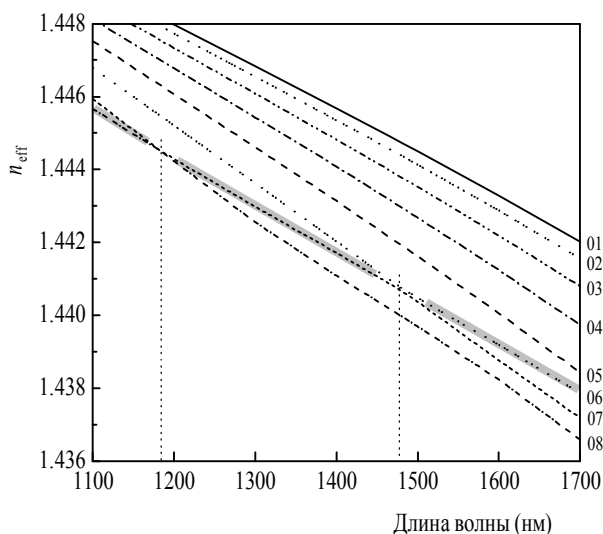
Покажем, каким образом возможно образование провалов в спектрах исследуемой структуры. Волокно SM630 имеет внутреннюю оболочку с пониженным показателем преломления, поэтому модовая структура этого волокна существенно отличается от структуры мод стандартного волокна. Мы произвели расчет эффективных показателей преломления мод волокна SM630 ( $n_{eff} = \beta / k_0$ , где  $\beta$  – постоянная рас-

пространения моды и  $k_0$  – волновое число в вакууме), предполагая, что волокно имеет ступенчатый профиль со следующими параметрами:  $r_{co} = 1.8$  мкм,  $n_{co} - n_{inn} = 0.0054$ ,  $r_{inn} = 25$  мкм,  $n_{cl} - n_{inn} = 0.0043$ ,  $r_{cl} = 62.5$  мкм, где  $n_{cl}$  рассчитывается с использованием формулы Селлмейера, описывающей дисперсию кварцевого стекла.

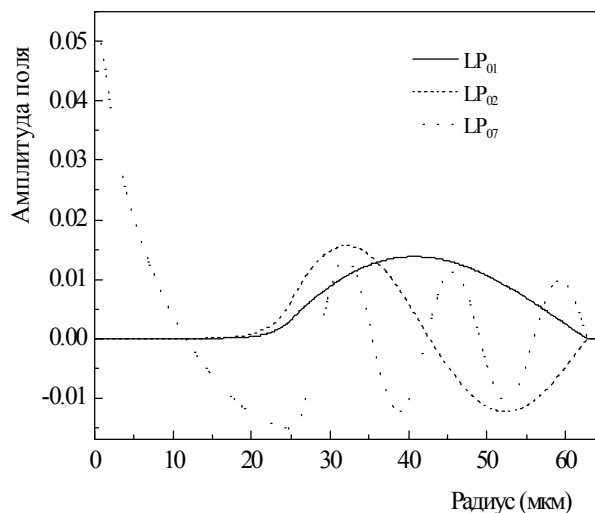
На рис. 4 приведены зависимости эффективных показателей преломления первых восьми азимутально-симметричных мод волокна SM630 от длины волны, рассчитанные в параксиальном приближении. Это приближение состоит в том, что предполагается распространение мод почти параллельно оси волокна и что относительная разность между эффективными показателями преломления мод и показателем преломления оболочки  $(n_{eff} - n_{cl})/n_{cl}$  является малой величиной. В этом приближении можно считать, что моды имеют линейную поляризацию и обозначить их  $LP_{lm}$ . Пары чисел на рисунке около кривых соответствуют нижним индексам  $lm$ , задающим модовые числа линейно поляризованных мод.

Зависимости для первых пяти мод близки к прямым и равномерно идут вниз с увеличением длины волны. Эти моды во всем исследуемом диапазоне длин волн являются модами внешней оболочки. Профили распределения поля двух из этих мод ( $LP_{01}$  и  $LP_{02}$ ) показаны на рис. 5. Поле этих мод в области сердцевины близко к нулю, а во внутренней оболочке отлично от нуля только вблизи границы внутренней и внешней оболочек.

Далее идут моды, которые меняют свой тип с изменением длины волны. Так мода  $LP_{06}$  до длины волны около 1480 нм является модой внешней оболочки, а после 1500 нм становится



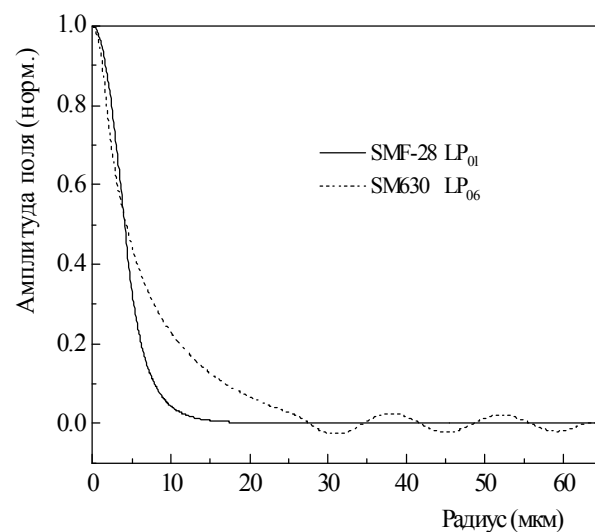
**Рис. 4.** Зависимости эффективных показателей преломления первых восьми мод волокна SM630 от длины волны. Пунктиром показаны длины волн, где происходит максимальное сближение зависимостей двух мод



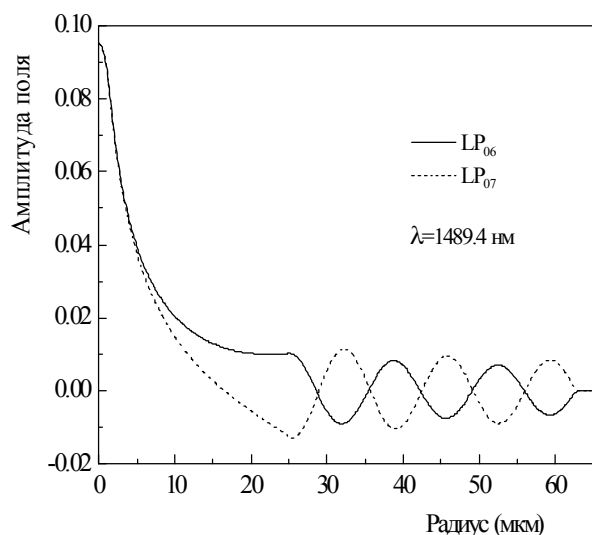
**Рис. 5.** Профили некоторых мод световода SM630 на длине волны излучения 1550 нм

модой сердцевины. Профиль моды  $LP_{06}$  на длине волны 1550 нм показан пунктирной линией на рис. 7, где видно, что большая часть энергии этой моды сосредоточена в центре волокна. Вместе с тем во внешней оболочке также присутствуют незначительные осцилляции поля моды. На длине волны 1490 нм возникает видимость пересечения зависимостей двух мод, тогда как в действительности есть только значительное сближение эффективных показателей преломления двух мод. При этом сближении происходит изменение типа мод: мода сердцевины  $LP_{07}$  становится модой оболочки, а мода  $LP_{06}$  становится модой сердцевины. Аналогичная ситуация имеет место на длине волны 1185 нм для мод  $LP_{07}$  и  $LP_{08}$ . На рис. 4 обведены участки зависимостей мод  $LP_{06}$ ,  $LP_{07}$  и  $LP_{08}$ , на которых они являются модами сердцевины.

Моды, следующие за модой сердцевины, являются модами всего волокна – их поле распро-



**Рис. 6.** Профили мод сердцевины оптических световодов SMF-28 и SM630 на длине волны излучения 1550 нм



**Рис. 7.** Профили  $LP_{06}$  и  $LP_{07}$  мод световода SM630 на длине волны 1489.4 нм, соответствующей точке сближения постоянных распространения двух мод

страняется как в сердцевине, так и во внутренней и внешней оболочках волокна (см. рис. 5, кривая  $LP_{07}$ ). На длине волны, соответствующей сближению зависимостей для двух мод, эти моды имеют схожие профили: поле присутствует и в сердцевине и в оболочке (см. рис. 7).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

При создании структуры, включающей отрезок волокна SM630, излучение из сердцевины волокна SMF-28 попадает на стыке в волокно SM630 с иным набором собственных мод. Энергия излучения перераспределяется между всеми модами волокна SM630. Самая эффективная передача энергии происходит в моду, имеющий профиль поля наиболее близкий к полю моды сердцевины волокна SMF-28. Такой модой является мода сердцевины волокна SM630, которая в зависимости от длины волны есть одна из мод  $LP_{06}$ ,  $LP_{07}$  или  $LP_{08}$ . В тоже время, можно отметить, что профиль моды сердцевины в волокне SM630 имеет существенно большую протяженность, чем профиль моды в стандартном волокне (рис. 6) в связи с тем, что сердцевина SM630 слабее направляет моду, чем сердцевина SMF-28. Так на радиусах больше 15 мкм амплитуда моды SM630 более чем на порядок превосходит амплитуду моды волокна SMF-28.

На участках длин волн, соответствующей сближению эффективных показателей преломления некоторых двух мод, отсутствует мода с профилем, близким к профилю моды сердцевины волокна SMF-28, и излучение переходит в обе эти моды, имеющие схожее распределение поля

в области сердцевины, а также в другие моды более высоких порядков (в том числе излучательные), имеющие ненулевые амплитуды поля в области сердцевины. Величина поля всех этих мод на внешней оболочке значительно больше поля моды сердцевины.

На втором стыке волокон излучение снова попадает в волокно SMF-28. Если в волоконной вставке распространялась в основном одна мода сердцевины, то эта мода преобразуется обратно в моду сердцевины и потери будут не значительны. Однако на длинах волн сближения постоянных распространения возбуждается много мод высоких порядков, возвращение которых в сердцевину происходит с большими потерями и сопровождается их интерференцией. Как видно из рис. 3, на экспериментальных спектрах пропускания в двух областях сближения постоянных (1185 нм и 1480) распространения наблюдаются соответствующие провалы.

Расчет показывает, что амплитуда поля моды сердцевины во внешней оболочке, а также на ее внешней границе увеличивается при увеличении длины волны. Поэтому при наличии поглощения на указанной границе потери для моды сердцевины также будут расти с длиной волны. Этот рост потерь на больших длинах волн мы и наблюдаем, когда окрашиваем волокно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен механизм образования провалов в спектрах волоконной структуры, основанной на вставке отрезка волокна SM630 с двойной оболочкой между стандартными волокнами SMF-28. Продемонстрировано, что провалы образуются на длинах волн, соответствующих сближению постоянных распространения двух мод волокна с двойной оболочкой.

### 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 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. 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.
2. Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И., Фролов А.А. Динамика наведения показателя преломления при облучении германосиликатных световодов различными типами УФ излучения // Квантовая электроника. 1997. Т.24. №9. С. 805-808
3. Терентьев В. С. Численное моделирование волоконного отражательного дифракционного интерферометра // Автометрия. 2012. Т. 48. №4. С. 41-54.
4. Liu Y. and Wei L. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers // Applied Optics. 2007. V.46. P.2516-2519
5. Kumar D., Sengupta S., Ghorai S.K. Distributed strain measurement using modal interference in a birefringent optical fiber // Measurements Science and Technology. 2008. V.19. Art. no. 065201
6. Chen T.-J. Use of liquid-crystal-clad fiber as modal filter for a two-mode fiber-optic interferometer // Optics Letters. 2004. V.29. P. 2852-2854.
7. Frazão O., et al. Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper // Optics Letters. 2006. V.31. P. 2960-2962.
8. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Гурбатов С.О. Спектр изогнутого волоконного интерферометра Фабри - Перо при малых вариациях показателя преломления внешней среды // Квантовая электроника. 2011. Т.41. №9. С. 821-823.
9. Dong X., Su L., Shum P. et al. Wavelength-selective all-fiber filter based on a single long-period fiber grating and a misaligned splicing point // Optics Communications. 2006. V.258. P. 159-163.
10. 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.
11. Chen W., Lou Sh., Wang L., S. Feng, H. Zou, W. Lu, Sh. Jian, In-fiber modal interferometer based on dual-concentric-core photonic crystal fiber and its strain, temperature and refractive index characteristics // Optics Communications. 2011. V. 284. P. 2829-2834.
12. Мажурина Ю.А., Мельников Л.А. О структуре областей волноводности высших мод фотонно-кристаллических волокон со сплошной сердцевиной // Оптика и спектроскопия. 2009. Т.107. С. 480-485
13. Choi H.Y. et al. Photonic crystal fiber interferometer composed of a long period fiber grating and one point collapsing of air holes // Optics Letters. 2008. V.33. P. 812-814.

## INTERACTION OF MODES IN A FIBER STRUCTURE BASED ON A SECTION OF DOUBLE-CLADDING FIBER

© 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 of RAS

We study interaction of modes in a fiber-optical structure based on a double-cladding fiber section with small core (SM630). Mode analysis is used to explain the mechanism of formation of the dips that are observed in the transmission spectra of the structure. It is shown that the dips are formed at wavelengths where the propagation constants of two modes are very close to each other.

Keywords: optical fiber, cladding modes, double-cladding fiber

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

E-mail: stygwaar@yandex.ru

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