

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТЕЙ МОД НА ВЫХОДЕ СТУПЕНЧАТОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЕГО ПРОГИБА

*С.В. Карпеев, В.С. Павельев, С.Н. Хонина  
Самарский государственный аэрокосмический университет,  
Институт систем обработки изображений РАН*

## **Аннотация**

Использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в волоконно-оптических преобразователях физических величин представляется весьма перспективным. Данная работа посвящена исследованию при помощи ДОЭ зависимости поперечно-модового состава в волкне со ступенчатым профилем показателя преломления от глубины микроизгиба. Описана экспериментальная установка, а также алгоритмы обработки экспериментальных данных, позволяющие проводить точные измерения мощности мод. Получена зависимость мощности моды  $LP_{11}$  от глубины изгиба волокна. Полученный результат позволяет рассчитывать на построение волоконно-оптических преобразователей с улучшенными характеристиками – динамическим диапазоном и точностью.

## **Введение**

Среди конструкций волоконно-оптических преобразователей физических величин значительное место занимают датчики микроперемещений, построенные на основе измерения потерь мощности излучения на микроизгибах световода. Ранее было предложено [1] осуществлять в таких преобразователях формирование и анализ поперечно-модового состава излучения в световоде с целью повышения чувствительности, расширения функциональных возможностей и устранения ряда конструктивных недостатков. Для формирования и анализа поперечно-модового состава предлагалось использовать дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Были проведены соответствующие эксперименты с многомодовыми градиентными световодами, которые показали существенное улучшение вышеупомянутых характеристик, однако также выявили и недостатки данного подхода, а именно наличие довольно большой (порядка 0,3-0,4 от максимума) постоянной составляющей в мощностях мод высших порядков, не зависящей от величины прогиба световода. Согласно теоретической модели для идеального параболического профиля такое явление не должно было наблюдаться. Поэтому его объяснение следует, видимо, искать в отклонении профиля показателя преломления световода от теоретической модели, а также в значительном числе высших мод в таких световодах, создающих помехи при неидеальности самих ДОЭ. С другой стороны, позднее [2] были успешно проведены эксперименты по анализу и формированию поперечно-модового состава излучения в световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при помощи ДОЭ. Были достигнуты более высокие селективность возбуждения и точность анализа поперечных мод такого световода ( $LP$ -мод), что объясняется, с одной стороны большей точностью воспроизведения профиля показателя преломления в таких волокнах, а с другой стороны – меньшим количеством мод высших порядков, и, соответственно, меньшим уровнем помех.

Поэтому использование ступенчатых световодов в волоконно-оптических преобразователях представляется весьма перспективным.

## **1. Принцип действия волоконно-оптического преобразователя на основе селекции поперечных мод когерентного излучения**

Физической основой построения волоконно-оптического преобразователя является связь мод, возникающая при деформации световода. При этом энергия излучения перераспределяется между модами, часть ее переходит в неканализуемые моды [3], что приводит как к изменению энергии отдельных мод, так и к уменьшению общего светового потока в волокне. Именно на регистрации общего светового потока основаны многие известные конструкции преобразователей. Однако этот эффект является вторичным и, следовательно, его чувствительность к деформациям существенно (в 4-5 раз для градиентного световода) меньше, чем чувствительности отдельных мод. Для повышения чувствительности общего светового потока используют конструкции преобразователей, где световод подвергается многократным периодическим изгибам с периодом, близким к периоду осцилляции луча в световоде, и таким образом возникают резонансные явления, способствующие увеличению потерь [4]. Такие конструкции, помимо сложности, обладают также и повышенной массой, что ухудшает механические частотные характеристики преобразователей. Было предложено [1] повысить чувствительность преобразователя путем регистрации не всего светового потока, а энергии отдельных мод. При этом, как известно из теории [5], чувствительность для основной моды повышается почти в 4 раза, а для мод высших порядков растет приблизительно пропорционально  $\sqrt{N+1}$ , где  $N$  – порядок моды (сумма индексов). Соответствующие эксперименты [1] подтвердили этот факт. При этом весь диапазон измеряемых деформаций оказывается в пределах 10-15 мкм, что позволяет упростить механическую конструкцию деформирующего устройства, ограничив-

шись всего одним изгибом с максимальной глубиной порядка 50-60 мкм (и таким же расстоянием между опорами, как в [1]), что не приводит к разрушению световода. Масса и габариты подвижной части деформирующего устройства при этом уменьшаются, что помимо массогабаритных характеристик улучшает и частотные характеристики. Кроме того, описываемая конструкция позволяет, измеряя энергии мод разных порядков, перестраивать чувствительность преобразователя в процессе измерений. Методы расчета и изготовления необходимых для этого многоканальных ДОЭ хорошо разработаны [6] к настоящему времени. Таким образом, описываемый преобразователь (рис. 1) включает: устройство возбуждения необходимых для измерений мод или их групп, деформирующее устройство, позволяющий производить изгиб световода с заданной глубиной, а также устройство анализа мощностей поперечных мод.

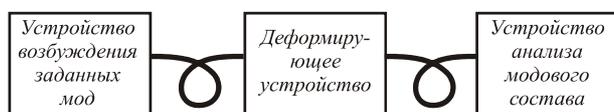


Рис. 1. Оптическая схема волоконно-оптического датчика

## 2. Описание экспериментальной установки

Из всех вышеупомянутых устройств в соответствии с принципиальной схемой (рис. 1) только деформирующее устройство нуждается в разработке и изготовлении. Остальные устройства описаны в [2] и требуют лишь небольших модификаций. Деформирующее устройство представляет собой основание 1 (рис. 2), на котором смонтированы рычаг (2) с возвратной пружиной (3) и нажимной пластиной (4) и узел регулируемых опор. Ось рычага опирается на призмы (5). Контроль перемещения рычага осуществляется при помощи индикатора (6), который установлен на одной платформе (7) с нажимным болтом (8). Сам узел регулируемых опор (рис. 2) включает два упора (9) для пружин (10), которые поджимают опоры (11), на которых и лежит волокно. Расстояние между опорами можно регулировать болтом (12) с коническим хвостовиком, который, проходя между опорами, ограничивает расстояние между ними. В данной работе расстояние между опорами выбиралось около 1 мм для обеспечения сравнимости с ранее полученными результатами [7]. Контролируемая деформация волокна осуществляется при вращении нажимного болта, который перемещает рычаг и, в соответствии с соотношением плеч рычага (около 1: 7,5), нажимную пластину.

Параметры устройства возбуждения заданных мод и волоконного световода, а также методика юстировки ничем не отличаются от описанных в работе [2]. Так же как и в [2] использовалось коммерческое одномодовое волокно SMF-28 длиной 2 м. Некоторые отличия в технике анализа мощностей поперечных мод обусловлены тем, что для данных измерений использовался другой ДОЭ, рассчитан-

ный для большего количества мод, чем описанный в работе [2]. Этот фазовый элемент подробно описан в работе [8]. В [8] его исследование носило качественный характер, в частности не проводилось детального исследования корреляционных пиков, а измерение мощностей мод должно проводиться именно в центре корреляционного пика. Для детального измерения корреляционных пиков необходимо изменить некоторые параметры элементов в устройстве измерения мощностей поперечных мод и настройку схемы [2].

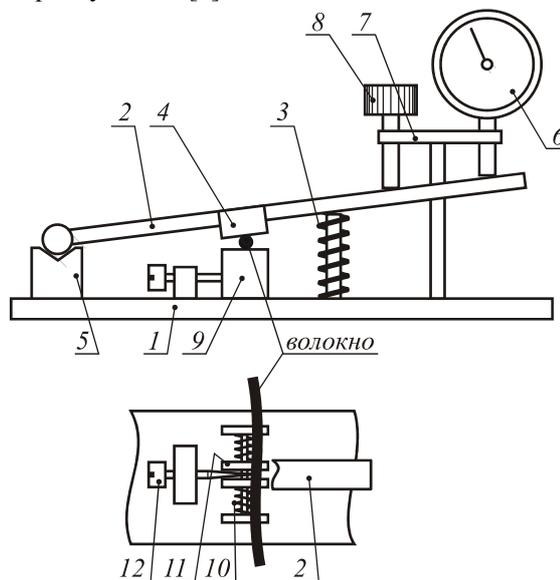


Рис. 2. Схема узла деформирующего устройства (в нижней части рисунка представлена схема узла регулируемых опор)

Так, фокусное расстояние микрообъектива для вывода излучения из волокна удобно сделать 13,9 мм, а фокусное расстояние Фурье-преобразующего объектива – 300 мм. При этом из-за большого (примерно в 5 раз) радиуса основной моды для получения требуемого масштаба в плоскости ПЗС-камеры необходимо помещать сам фазовый элемент не в параллельный пучок, как в работе [2], а в расходящийся, с тем, чтобы расстояние от Фурье-преобразующего объектива до ПЗС-камеры составляло около 1 м. В поле зрения ПЗС-камеры оказывается около девяти различных мод, и среди них все, существующие в данном волокне. Такой масштаб, как будет показано в дальнейшем, обеспечивает приемлемую (на уровне шумов) систематическую погрешность измерений.

## 3. Настройка оптической схемы и обработка экспериментальных результатов

В работе [2] была предложена процедура измерения мощностей мод при помощи корреляционных фильтров, включающая два основных этапа. На первом этапе формируется тестовый сигнал, позволяющий провести точную юстировку всех оптических элементов и определить центры дифракционных порядков для дальнейшего измерения мощностей мод в многомодовом пучке. Тестовый

сигнал должен, во-первых, излучаться самим волокном именно в той конфигурации, которая в дальнейшем будет использована для основных измерений, во-вторых, должен давать возможность независимой (без использования корреляционного фильтра) проверки его соответствия теоретической модели и, в третьих, – обладать симметрией для произведения необходимых юстировок и нахождения центров дифракционных порядков. Этим требованиям, в принципе, удовлетворяет любой одноименный пучок, однако в работе [2] в качестве тестового сигнала было предложено использовать основную моду волокна. Такой выбор обусловлен в первую очередь наименьшей трудоемкостью контроля распределения основной моды, процедура которого хорошо отработана, не требует контроля фазы и имеется во многих прикладных пакетах. Кроме того, настройка на основную моду наиболее устойчива к разъюстировкам устройства ввода в волокно. Юстировка оптической схемы для тестового сигнала подробно описана в работе [2]. Единственное отличие данной работы в том, что у использовавшегося фильтра отсутствовала основная мода. Но главный критерий настройки - минимальные значения интенсивности в центрах всех дифракционных порядков здесь остается неизменным. На рис.3 приведено распределение интенсивности в выходной плоскости Фурье-каскада с пространственным фильтром (корреляционное поле) при настройке ввода в волокно на основную моду.

При вводе изображения необходимо следить, чтобы во всех дифракционных порядках, кроме нулевого (он отмечен стрелкой на рис. 3) отсутствовало насыщение, так как в дальнейшем это может снизить точность нахождения центров дифракционных порядков. Для этого в программе ввода было предусмотрено отображение в процессе настройки другим цветом участков, где наблюдается насыщение. Теперь по корреляционному полю тестового сигнала необходимо определить центры всех дифракцион-

ных порядков и запомнить их координаты для дальнейшего измерения в них интенсивности корреляционных пиков. Очевидно, что при наличии симметрии распределения интенсивности в дифракционном порядке, центр дифракционного порядка можно найти как центр тяжести в распределении интенсивности. Однако предварительно необходимо выделить области расположения дифракционных порядков. Эта процедура осуществляется путем выделения соответствующих областей на изображении, где расположены дифракционные порядки. Из рис. 3 видно, что в областях дифракционных порядков симметрично располагается ряд пятен с ненулевой интенсивностью, то есть области в целом не обладают связностью, однако для точного определения центра дифракционного порядка необходимо учитывать все эти пятна. Соответствующая программа после предварительной обработки находит все области с ненулевой интенсивностью, а затем восстанавливает их связность по критерию близости расположения. На рис. 4 представлен результат работы программы нахождения центров дифракционных порядков.

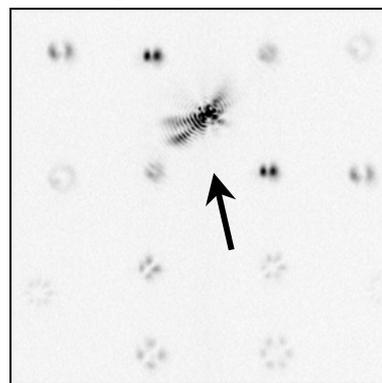


Рис. 3. Распределение интенсивности в выходной плоскости Фурье-каскада с пространственным фильтром при настройке ввода в волокно на основную моду

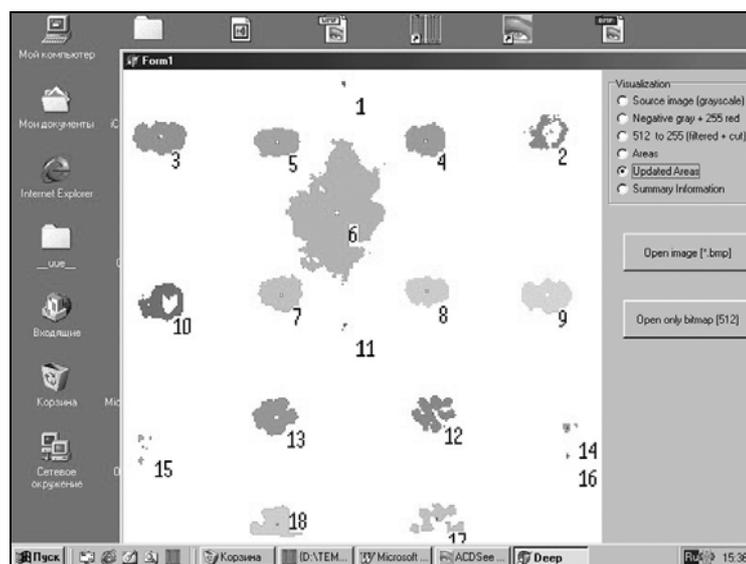


Рис. 4. Результат работы программы нахождения центров дифракционных порядков

Показанный результат соответствует выделению областей, восстановлению их связности и нахождению центров (пункт меню Updated areas). Точками отмечены центры порядков, а цифрами рядом с ними – их порядковые номера. Таблица 1 показывает связь порядковых номеров с конкретными модами. Области 1 и 11 были распознаны ложно. На самом деле они являются шумовыми выбросами. В меню программы предусмотрена также распечатка всей информации (координаты найденных центров,

значения интенсивности в центрах, математическое ожидание и дисперсия) по найденным областям (Summary information). Информация о расположении центров подлежит запоминанию в программе, с тем, чтобы в дальнейшем, после некоторой обработки (сглаживания), использовать значения интенсивности именно в этих точках. Для интересующих нас мод низших порядков значения интенсивностей в найденных центрах при тестовом сигнале (рис. 4) не превышают уровня шумов (3-4% от максимума).

Таблица 1. Соответствие нумерации порядков на рис. 4 индексам мод (рис. 3, 5, 7)

Номер порядка	2	3	4	5	7	8	9	10	12	13
Мода	$LP_{03}$	$LP_{12}$	$LP_{02}$	$LP_{11}$	$LP_{02}$	$LP_{11}$	$LP_{12}$	$LP_{03}$	$LP_{31}$	$LP_{21}$

#### 4. Исследование зависимости мощности селективно возбужденной моды от глубины микроизгиба волоконного световода

Теперь можно перейти к следующему этапу, а именно, к измерению зависимости мощности моды от величины деформации волокна. Была выбрана та же мода  $LP_{11}$ , что и в статье [2]. Вид корреляционного поля при ее возбуждении показан на рис. 5. Отчетливо виден соответствующий корреляционный пик, а также отсутствие пиков в других порядках дифракции.

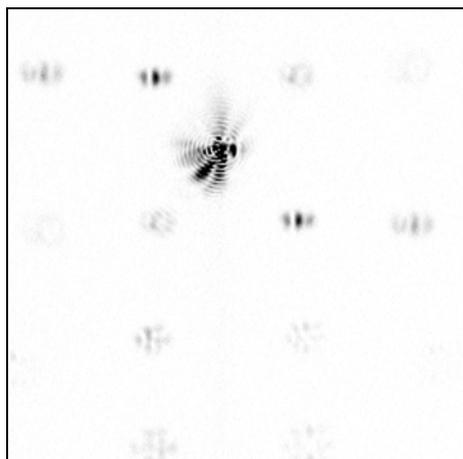


Рис. 5. Распределение интенсивности в выходной плоскости Фурье-каскада с пространственным фильтром при настройке на моду  $LP_{11}$  волокна

На рис. 6 показана область расположения корреляционного пика. Видно, что на пик приходится 10-15 пикселей по каждой оси, что вполне достаточно для его измерения с погрешностью, не превышающей уровень шумов.

Также видно наличие шума, который может искажать истинное значение высоты пика, если брать его в одном центральном пикселе. Поэтому необходимо проводить сглаживание пика путем его аппроксимации параболой по методу наименьших квадратов. При деформации волокна вид корреляционного поля меняется из-за перераспределения энергии между модами. При этом нарушается сим-

метрия распределений интенсивности в дифракционных порядках.

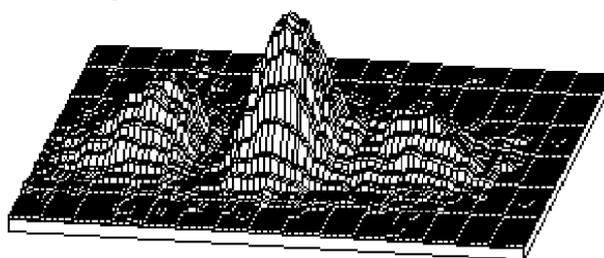


Рис. 6. Область расположения корреляционного пика

На рис. 7 показано корреляционное поле при глубине изгиба 60 мкм. Остальные параметры оптической схемы те же, что и для рис. 5.

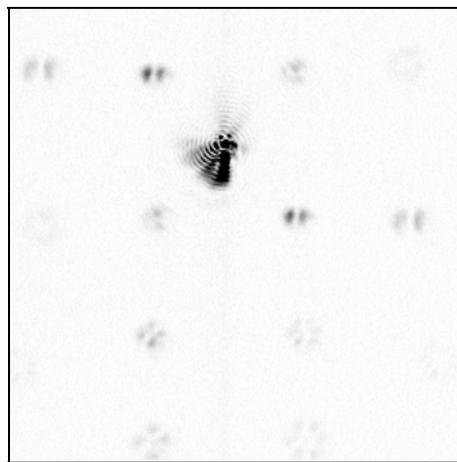


Рис. 7. Распределение интенсивности в выходной плоскости Фурье-каскада с пространственным фильтром при глубине изгиба волокна 60 мкм

В соответствие с алгоритмом измерений, описанным выше, в этом случае высотой пика считается значение интенсивности в найденном центре дифракционного порядка, полученное после сглаживания, хотя оно уже может находиться и не в точке с максимальной интенсивностью. На рис. 8 приведена экспериментальная кривая зависимости мощности моды  $LP_{11}$  от глубины изгиба волокна.

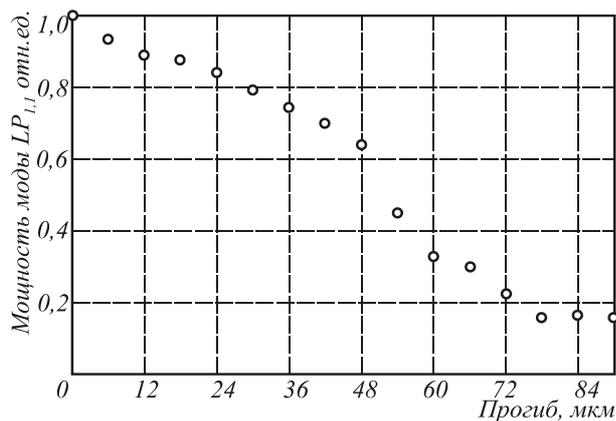


Рис. 8. Зависимость мощности моды  $LP_{11}$  от глубины изгиба волокна

Зависимость носит нелинейный характер. Видно, что доля постоянной составляющей в ней всего около 0,17 в отличие от результатов, полученных ранее для градиентного волокна [7], где она была около 0,3-0,4. Этот результат лучше соответствует теории и дает возможность увеличить динамический диапазон и точность преобразователя, базирующегося на данном эффекте.

#### Заключение

В данной работе представлены результаты исследования зависимости мощности моды в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления от глубины микроизгиба. Описана экспериментальная установка а также алгоритмы обработки экспериментальных данных, позволяющие проводить измерения мощности мод с точностью 3-4%. Измерена зависимость мощности моды  $LP_{11}$  от глубины изгиба волокна. Полученный результат позволяет рассчитывать на создание волоконно-оптических преобразователей с улучшенными характеристиками - динамическим диапазоном и точностью.

#### Благодарность

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ №№ МД-209.2003.01 и НШ-1007.2003.1, а также российско-американской программы «Фун-

даментальные исследования и высшее образование» («BRHE»).

Дифракционный оптический элемент изготовлен на технологической базе университета Йёнсуу (Финляндия) в группе под руководством проф. Яри Турунена.

#### Литература

1. Garitchev V.P., Golub M.A., Karpeev S.V. et. al Experimental investigation of mode coupling in a multimode graded-index fiber, caused by periodic microbends using computer-generated spatial filters // Optics Communication, 1985. Vol 55. № 6. P. 403-405.
2. Карпеев С.В., Павельев В.С., Дюпарре М. и др. Анализ и формирование поперечно-модового состава когерентного излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при помощи ДОЭ // Компьютерная оптика, Самара - Москва. 2002. Вып 23, С. 10-14.
3. Солимено С., Крозиньяни Б., Порто П. Ди Дифракция и волноводное распространение оптического излучения // М.: Мир, 1989.
4. Шевченко В.В. Потери на излучение в изогнутых волноводах поверхностных волн // Изв. Вузов, Радиотехника, 1971. №5. С. 768.
5. Кривошлыков С.Г., Сисакян И.Н. Функциональные возможности и чувствительность датчиков на основе многомодовых градиентных оптических волноводов // Квантовая электроника, 1987. Т. 14. № 3. С. 481-491.
6. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements // Edited by Victor A. Soifer—John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2002.
7. Golub M.A., Sisakyan I.N., Soifer V.A., Uvarov G.V. Mode-selective fiber sensor operating with computer generated optical elements // Proceedings SPIE, OFSC'91, 1572, 101, 1991.
8. Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Котляр В.В. Фазовый дифракционный фильтр, предназначенный для анализа световых полей на выходе волокна со ступенчатым профилем показателя преломления // Компьютерная оптика, Самара-Москва, 2003. Вып. 25.

# Investigation of the dependence of the mode powers at the output of a stepped fiber waveguide on the magnitude of its deflection

S.V. Karpeev<sup>1,2</sup>, V.S. Pavelyev<sup>1,2</sup>, S.N. Khonina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of RAS

## Abstract

The use of diffractive optical elements (DOE) in fiber-optic physical value converters seems to be very promising. This work is devoted to the DOE-assisted research of the dependence of the transverse-mode composition of a fiber with a stepped refractive index profile on a microbend depth. An experimental setup is described, as well as the algorithms for processing experimental data that provide for accurate measurements of the mode power. The dependence of the LP11 mode power on the fiber bend depth is obtained. The result allows to anticipate the construction of fiber-optic converters with improved characteristics - dynamic range and accuracy.

**Keywords:** fiber waveguide, magnitude deflection, diffractive optical elements, DOE, fiber-optic, microbend, LP11 mode.

**Citation:** Karpeev SV, Pavelyev VS, Khonina SN. Investigation of the dependence of the mode powers at the output of a stepped fiber waveguide on the magnitude of its deflection. *Computer Optics* 2003; 25: 95-99.

## References

- [1] Garitchev VP, Golub MA, Karpeev SV, et. al Experimental investigation of mode coupling in a multimode graded-index fiber, caused by periodic microbends using computer-generated spatial filters. *Opt Commun* 1985; 55(6): 403-405.
- [2] Karpeev SV, Pavelyev VS, Duparre M, et al. Analysis and formation of the transverse-mode composition of coherent radiation in a fiber optic waveguide with a stepped refractive index profile using DOE [In Russian]. *Computer Optics* 2002; 23: 10-14.
- [3] Solimeno S, Crosignani B, Di Porto P. Guiding, diffraction, and confinement of optical radiation. New York: Academic Press Inc; 1986.
- [4] Shevchenko V. Radiation losses in bent waveguides for surface waves [In Russian]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii: Radiofizika* 1971; 5: 768.
- [5] Krivoshlykov SG, Sisakyan IN. Functional potentialities and sensitivity of sensors made from multimode graded-index optical waveguides. *Soviet Journal of Quantum Electronics*; 1987; 14(3): 299-305.
- [6] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Wiley & Sons Inc; 2002.
- [7] Golub MA, Sisakyan IN, Soifer VA, Uvarov GV. Mode-selective fiber sensor operating with computer generated optical elements. *Proc SPIE* 1991; 1572: 101-106.
- [8] Khonina SN, Skidanov RV, Kotlyar VV, Soifer VA. Phase diffractive filter to analyze an output step-index fiber beam [In Russian]. *Computer Optics* 2003; 25: 89-94.