

# 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.

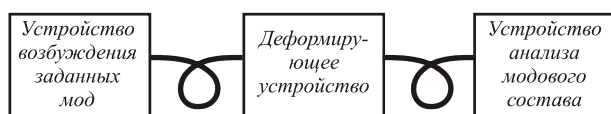


Рис. 1. Оптическая схема волоконно-оптического датчика

## 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].

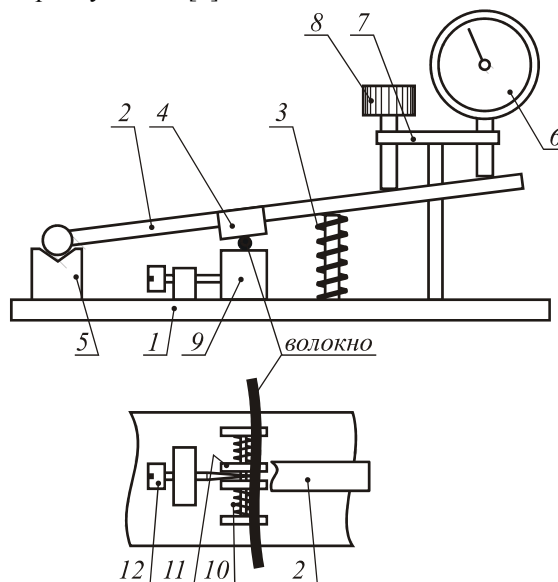


Рис. 2. Схема узла деформирующего устройства (в нижней части рисунка представлена схема узла регулируемых опор)

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.

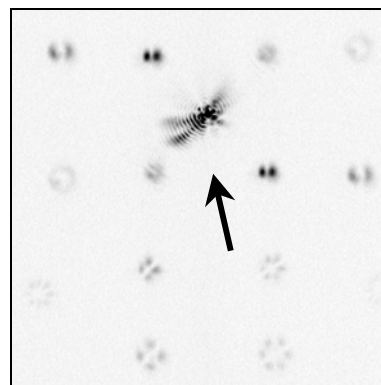


Рис. 3. Распределение интенсивности в выходной плоскости Фурье-каскада с пространственным фильтром при настройке ввода в волокно на основную моду

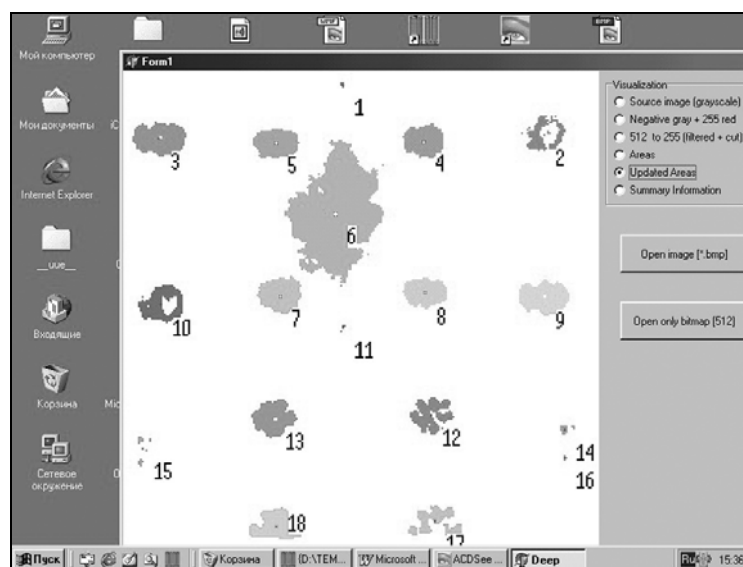


Рис. 4. Результат работы программы нахождения центров дифракционных порядков

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.

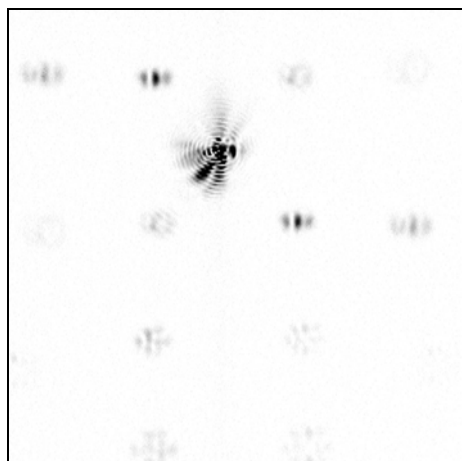


Рис. 5. Распределение интенсивности в выходной плоскости Фурье-каскада с пространственным фильтром при настройке на моду  $LP_{11}$  волокна

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.

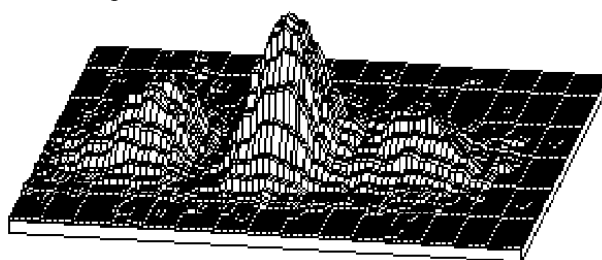


Рис. 6. Область расположения корреляционного пика

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

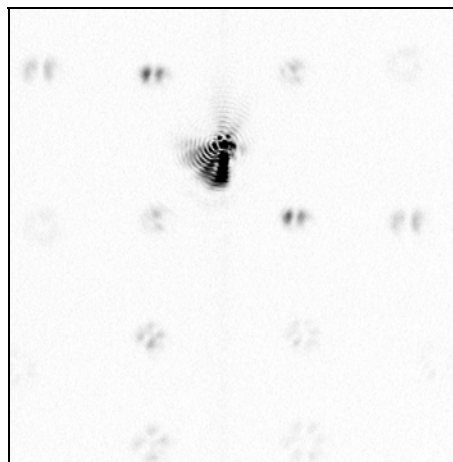


Рис. 7. Распределение интенсивности в выходной плоскости Фурье-каскада с пространственным фильтром при глубине изгиба волокна 60 мкм

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.

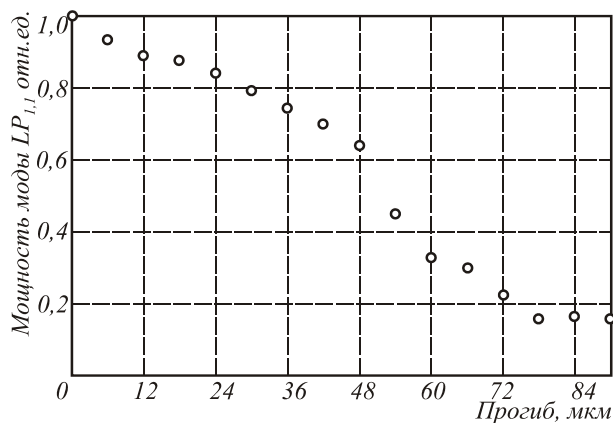


Рис. 8. Зависимость мощности моды LP<sub>11</sub> от глубины изгиба волокна

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<sub>11</sub> 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.