

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКЕ

АНАЛИЗ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНО-МОДОВОГО СОСТАВА КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ДОО

С.В. Карпеев, В.С. Павельев, М. Дюпарре¹, Б. Людге¹, К. Рокитул¹, З. Шротер²
Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет

¹ Институт прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университета (Йена, Германия)

² Институт физических высоких технологий (Йена, Германия)

Аннотация

Задачи измерения распределения мощности по поперечным модам когерентного излучения в волоконных световодах и возбуждения в световоде заданных поперечных мод или их групп имеют практическое значение для разработки и исследования волоконных лазеров, датчиков, линий волоконно-оптической связи. Данная работа посвящена исследованию возможности селекции LP – мод на выходе оптоволокна с помощью бинарных амплитудных МОДАНов. Разработана методика измерения поперечно - модового состава излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления и проведены измерения при различных условиях возбуждения. Произведено селективное возбуждение в волоконном световоде моды низшего порядка, отличной от основной, с помощью фазового МОДАНа.

Введение

Задачи измерения распределения мощности по поперечным модам когерентного излучения в волоконных световодах и возбуждения в световоде заданных поперечных мод или их групп имеют практическое значение для разработки и исследования волоконных лазеров, датчиков, линий волоконно-оптической связи.

Ранее сообщалось [1] о создании специальных дифракционных оптических элементов (ДОО) - МОДАНов для решения таких задач, однако экспериментальные исследования ограничивались исследованием самих МОДАНов [2, 3], либо модовых пучков при их распространении в свободном пространстве [3, 4]. В ряде работ [5, 6] анализ и формирование поперечных мод в волоконных световодах проводился с помощью МОДАНов, причем исследовались многомодовые градиентные световоды с большим (более 100) количеством поперечных мод.

Однако в этих работах отсутствует полная информация по целому ряду вопросов, связанных с верификацией результатов исследований и юстировкой оптической схемы. Отклонения результатов от теоретических объясняется отклонением профиля показателя преломления кварцевых световодов от идеального параболического, в частности наличием центрального провала. Конечно, эти причины имеют место, однако главной причиной погрешностей является все-таки чересчур большое количество мод в таких световодах. Трудно себе представить, как можно измерять с помощью когерентно - оптических методов сигналы отдельных мод, мощность которых составляет порядка 1% от общей мощности сигнала. Кроме того, юстировка фильтра при многомодовом режиме возбуждения волокна (а достигнуть

одномодового режима в них не представляется возможным) в принципе может осуществляться только по положению границ сердечника, что, конечно, не обеспечивает необходимой точности.

Таким образом, очевидно, что на сегодняшний день получение достоверных результатов возможно лишь для волокон с весьма ограниченным (не более 10 - 15) количеством мод и возможностью селективного возбуждения основной моды.

Такие условия могут быть достигнуты в промышленно выпускаемых одномодовых волокнах, предназначенных для организации оптической связи на длине волны 1,3 – 1,55 мкм, при их возбуждении He-Ne лазером с длиной волны 0,6328 мкм. Нормированная частота $V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, где k - волновое число, a - радиус сердечника, n_1, n_2 - показатели преломления сердечника и оболочки, соответственно, при изменении длины волны возрастает примерно с 2 до 5, и по количеству мод волокно становится маломодовым. Перспективность такого подхода подтверждается публикациями об успешных экспериментах по селективному возбуждению поперечных мод в маломодовых волокнах другими методами [7].

Определение основных параметров анализирующего МОДАНа, и проверка его работоспособности

Анализирующий МОДАН должен позволять одновременно определять содержание каждой разрешенной моды (т.е. моды, являющейся каналируемой для данного волновода) в пучке. Удобнее всего реализовать такой МОДАН в виде амплитудной бинарной голограммы, имеющей функцию комплексного пропускания вида

$$H(\mathbf{x}) = \sum_{n=0}^{N_{mod}} \psi_n^*(\mathbf{x}) \exp(i2\pi \mathbf{v}_n \mathbf{x}),$$

где $\mathbf{x} = (x, y)$, $\mathbf{v}_n = (v_{nx}, v_{ny})$ - вектор, определяющий координаты центра дифракционного порядка, соответствующего модовой функции $\psi_n(x)$. В [2] показано, что корреляционные пики, интенсивность которых пропорциональна содержанию в пучке соответствующей моды, будут наблюдаться в выходной плоскости Фурье - каскадом в точках с координатами $\mathbf{x}_n = \mathbf{v}_n \lambda f$. Необходимо выбрать такие \mathbf{v}_n , чтобы при заданном f все корреляционные пики располагались в поле зрения ПЗС-камеры. Кроме того, необходимо выбрать радиус луча основной моды ω_0 на МОДАНе. Здесь имеется ряд противоречивых требований - с одной стороны, увеличивая ω_0 , мы экономим разрешение устройства вывода и снижаем требования к точности установки МОДАНа, но с другой стороны радиус луча основной моды в выходной плоскости $\omega = \lambda f / \pi \omega_0$, причем характерные размеры отдельных пятен, составляющих картины мод высших порядков, можно примерно оценить по каждой оси как $\omega/(p+1)$, где p - порядок моды вдоль соответствующей оси. Характерный размер корреляционного пика связан с радиусом корреляции, который в свою очередь определяется характерными размерами пятен. Таким образом, если задаться некоторым минимальным количеством элементов разрешения m , требуемых для регистрации области корреляционного пика, то можно определить максимальный размер ω_0 . Простой расчет показывает, что для $\lambda=0,63$ мкм, $f=375$ мм, $p=3$, $m=10$ получаем ω_0 около 0,5 мм.

Соответствующий МОДАН для пяти LP-мод низших порядков был реализован в виде бинарной амплитудной голограммы Ли с числом ячеек 512x512 по технологии лазерной микролитографии. Можно предположить, что LP-моды, как минимум низших порядков, достаточно стабильны при распространении в пространстве. Для проверки этого предположения была собрана оптическая схема (см. рис. 1) в которой изготовленный МОДАН освещался плоскопараллельным пучком He-Ne лазера и полученные распределения исследовались при помощи ПЗС-камеры в ближней и дальней зонах дифракции, что соответствует двум положениям ПЗС-камеры, показанным на рисунке.

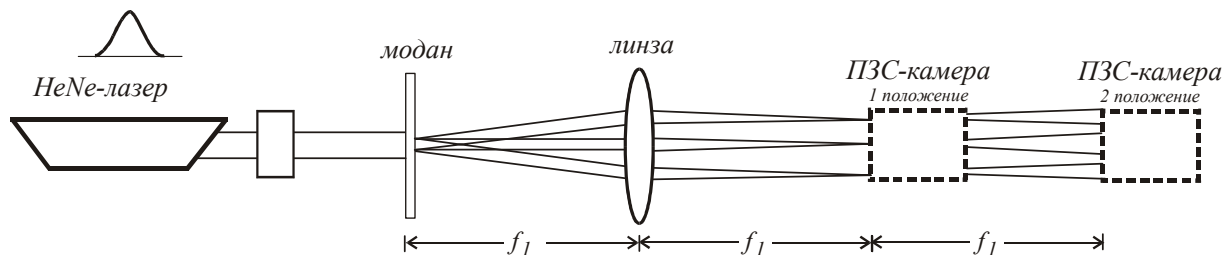


Рис. 1 Оптическая схема для исследования МОДАНа

Сравнивая полученные распределения интенсивности в фокусе (рис. 2) и на двойном фокусном расстоянии (рис. 3) можно убедиться в обоснованности предположения о стабильности этих мод.

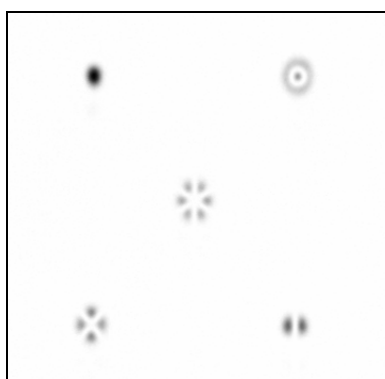


Рис. 2. Распределения интенсивности мод в дальней зоне (1 положение на рис. 1)

Измерение распределения мощности по модам в волоконном световоде

Для экспериментальных исследований была собрана оптическая схема (см. рис. 4), включающая два микрообъектива М1 и М2 для ввода и вывода

излучения, два МОДАНа - формирующий (Модан 1) и анализирующий (Модан 2), а также Фурье - преобразующий объектив (Линза).



Рис.3. Распределения интенсивности мод в ближней зоне (2 положение на рис. 1)

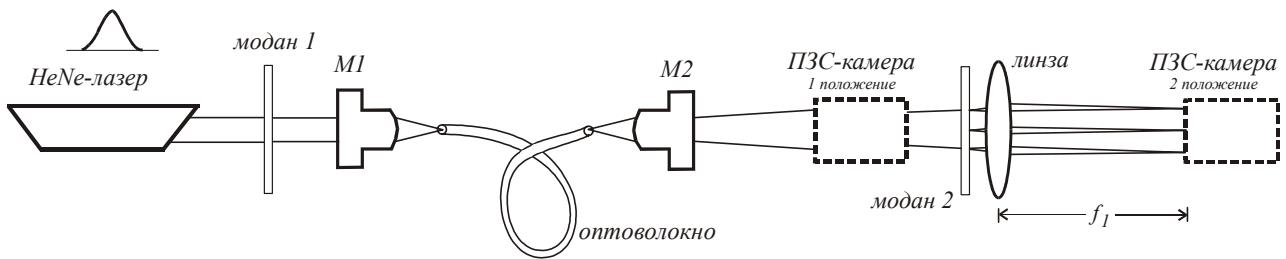


Рис. 4. Оптическая схема установки для анализа и формирования поперечных мод в волоконном световоде

Волоконный световод производства Corning Glas SMF 28 имеет следующие параметры $n_1=1,4619$, $n_2=1,457$, $d=8,3$ мкм, длина световода около 2 м. Нормированная частота V в таком волокне для $\lambda=0,63$ мкм около 5, поэтому радиус перетяжки основной моды ω_0 близок к радиусу сердечника, следовательно, расходимость основной моды $\theta = \lambda / \pi \omega_0$ около 0,05. Для согласования ее размера с размером перетяжки на МОДАНе ω фокусное расстояние микрообъектива M2 должно быть $f = \omega / \theta$ около 10 мм (примерно соответствует 16X микрообъективу). На первом этапе эксперимента формирующий МОДАН заменялся плоскопараллельной пластинкой. Для ввода излучения в волокно использовался 20X микрообъектив M1. Радиус перетяжки луча использовавшегося лазера был около 0,5 мм, поэтому перетяжка в фокусе M1 получается несколько меньше требуемой. Однако в дальнейшем для формирования мод высших порядков необходим именно такой микрообъектив, а на данном этапе размер перетяжки может быть скорректирован небольшой дефокусировкой. Юстировка такой схемы включает:

1. Юстировку узла ввода излучения в волокно по 5 степеням свободы (координаты x , y , z и два угла). Используемое устройство не имело угловых регулировок непосредственно конца волокна, поэтому для изменения углов ввода излучения весь узел ввода перемещался по осям x , y относительно луча лазера. Для контроля выходного распределения интенсивности на этом этапе ПЗС-камера помещалась непосредственно за микрообъективом M2. Целью данной операции являлось достижение максимального содержания в пучке основной моды (визуально по наименьшему диаметру пятна, и его симметрии).

2. Предварительную фокусировку микрообъектива M2 по критерию максимума ширины интерференционных полос, возникающих при отражении от двух граней плоскопараллельной пластины, помещаемой под углом за микрообъективом M2.

3. Юстировка взаимного положения МОДАНа и выходного торца волокна по осям x , y . Легко выполняется по критерию симметрии распределений интенсивности, соответствующих различным модам.

4. Окончательная фокусировка микрообъектива M2 по оси z . Критерием является достижение минимума интенсивности в центрах всех дифракционных порядков кроме того, который соответствует основной моде. При этом получение этих значений интенсивности на уровне шумов свидетельствует о

достижении режима возбуждения одной основной моды. Дополнительной проверкой данного условия служит соответствие размеров пятна основной моды после микрообъектива M2 расчетным, и отсутствие изменений в корреляционном поле при перемещении МОДАНа вдоль оси z . При этом положении необходимо найти и запомнить координаты центров всех дифракционных порядков, что легко сделать, пользуясь симметрией картины. В дальнейшем, при измерении пучков с произвольным модовым составом, измерения должны проводиться именно в этих точках. Основная трудность юстировки схемы на этом этапе состоит в возможном поперечном смещении луча после объектива M2 в процессе фокусировки. Причиной этого смещения является несоосность микрообъектива и торца волокна, как угловая, так и пространственная, а также отклонения от перпендикулярности среза торца волокна. Разделить эти составляющие оказалось весьма сложно, поэтому в процессе выполнения данного этапа юстировки схемы иногда приходилось возвращаться к этапу 3.

На рис. 5 приведено распределение интенсивности в корреляционном поле при измерении пучка основной моды волокна, а на рис. 6 - распределение интенсивности основной моды на выходе из волокна. Измерения мощности всех мод, отличных от основной, дают значения не более 5% от мощности основной моды, то есть на уровне шумов.

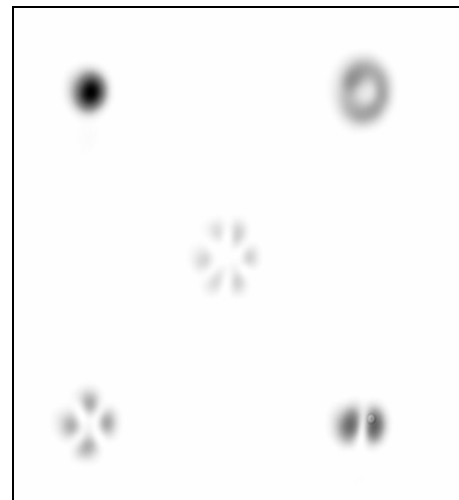


Рис. 5. Распределение интенсивности в корреляционном поле при измерении пучка моды LP_{01} волокна

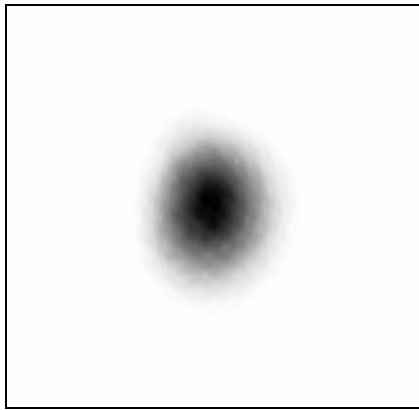


Рис. 6. Распределение интенсивности моды LP_{01} на выходе из волокна

Теперь можно измерять поперечно-модовый состав излучения при различных условиях возбуждения волокна. Так, при поперечном сдвиге входного торца волокна на 1 мкм (см. рис. 7 - распределение на выходе волокна, рис. 8 - распределение в корреляционном поле) происходит существенный рост мощности моды (1,0).

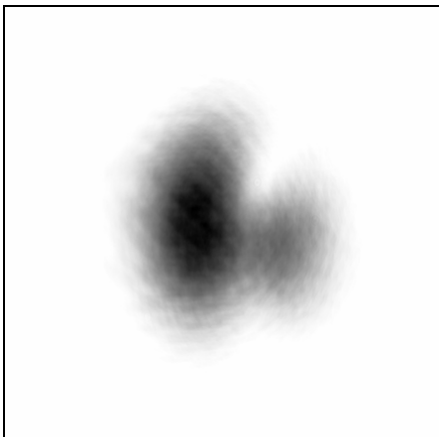


Рис. 7. Распределение на выходе волокна при поперечном сдвиге входного торца

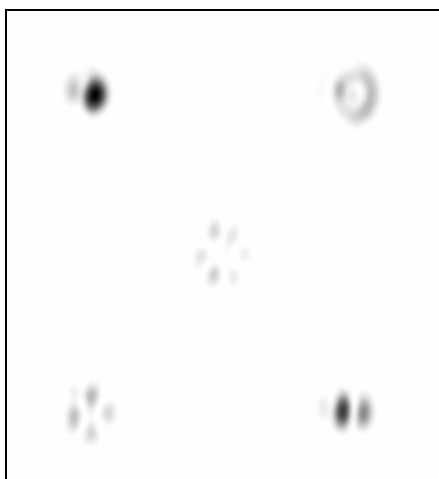


Рис. 8. Распределение в корреляционном поле при сдвиге входного торца

Сдвиг торца вдоль оптической оси на 15 мкм (см. корреляционное поле рис. 9) не приводит к таким заметным изменениям.

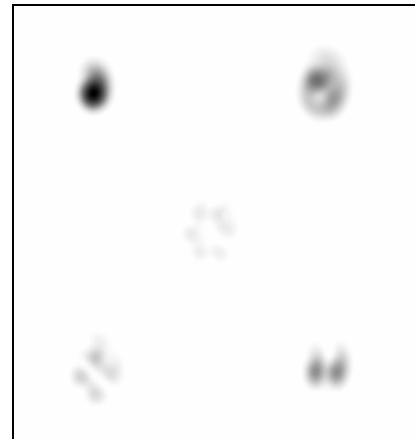


Рис. 9. Распределение в корреляционном поле при сдвиге торца вдоль оптической оси

Происходит лишь небольшое перераспределение энергии между радиально-симметричными модами (основной и следующей по порядку). Возбуждения более высоких мод удается добиться лишь, изменяя угол ввода излучения. Распределение интенсивности на выходе волокна и в корреляционном поле при изменении угла ввода на 0,1 рад показано на рис. 10 и 11, соответственно. Видно практическое исчезновение основной моды.

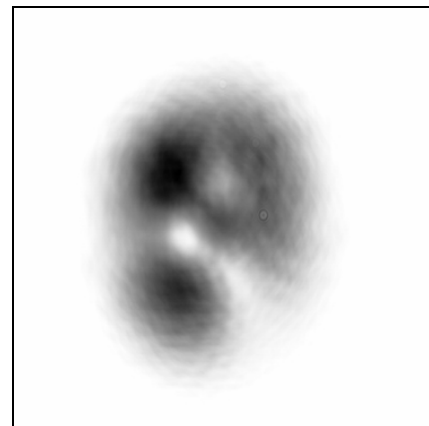


Рис. 10. Распределение интенсивности на выходе из волокна при изменении угла ввода моды LP_{01}

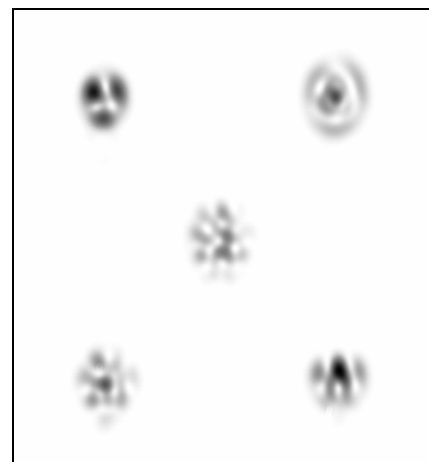


Рис. 11. Распределение интенсивности в корреляционном поле при изменении угла ввода моды LP_{01}

Возбуждение заданной моды в волоконном световоде

Имея теперь инструмент для измерения поперечно-модового состава, мы можем достоверно судить о селективном возбуждении отдельных мод в отличие от работы [6], где вывод об отсутствии других мод делался на основании точечных измерений. Кроме того, полученные результаты косвенно свидетельствуют о сохранении направления поляризации излучения в таком волокне и, следовательно, сохранении структуры отдельной моды на выходе. Для возбуждения моды LP_{11} использовался фазовый МОДАН, рассчитанный итерационным методом [3]. Хотя расчет проводился для моды Гаусса–Эрмита (1,0) есть основания считать, что распределение интенсивности такой моды весьма близко к распределению интенсивности LP_{11} моды. Параметры расчетного освещающего пучка для этого МОДАНа близки к параметрам используемого лазера, а радиус перетяжки получаемой моды около 0,3 мм. Таким образом, радиус перетяжки в фокусе микрообъектива М1 весьма близок к требуемому, что позволяет вводить МОДАН в лазерный луч без каких-либо дополнительных изменений в схеме. При начальной настройке на основную моду плоскопараллельная подложка формирующего МОДАНа (Модан 1) уже присутствует в луче и ее параллельный сдвиг не вызовет каких-либо изменений условий ввода. Это позволяет существенно сократить время настройки схемы на возбуждение другой моды, используя настройку на основную моду, как базовую. Необходимо лишь передвигать подложку формирующего МОДАНа до попадания в лазерный луч фазовой структуры, при этом лишь немного изменяя фокусировку по критерию максимально эффективного ввода. Контролируя при этом корреляционное поле, убеждаемся в возбуждении требуемой моды (см. рис. 12).

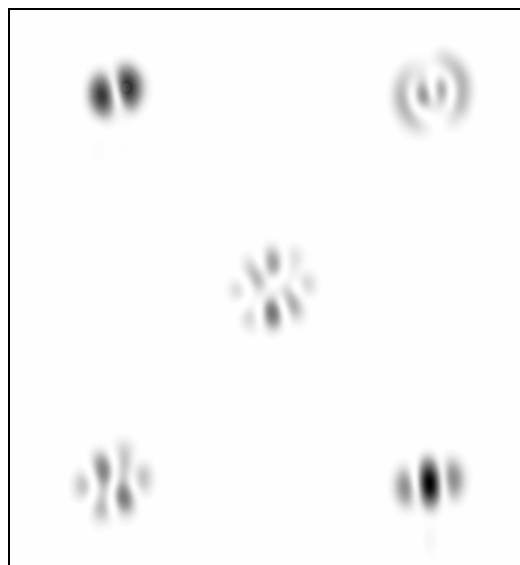


Рис. 12. Распределение интенсивности в корреляционном поле при возбуждении моды с помощью фильтра

В оптической схеме показанной на рис. 4 не предусмотрен поворот волокна вокруг оси, поэтому необходимо дополнительно проконтролировать угловую ориентацию возбуждаемой моды. Полученное в эксперименте распределение интенсивности на выходе волокна при возбуждении моды LP_{11} (см. рис. 13) свидетельствует о сохранении угловой ориентации введенной моды на всем протяжении волокна.



Рис. 13. Распределение интенсивности на выходе волокна при возбуждении моды LP_{11}

Волокно было свободно уложено кольцами диаметром около 20 см. Для подтверждения модового характера амплитудно-фазового распределения, полученного на выходе волокна, регистрировалось распределение, вышедшего из волокна пучка в дальней зоне (см. рис. 14), для чего в схеме (рис. 4) удался анализирующий МОДАН (Модан 2).

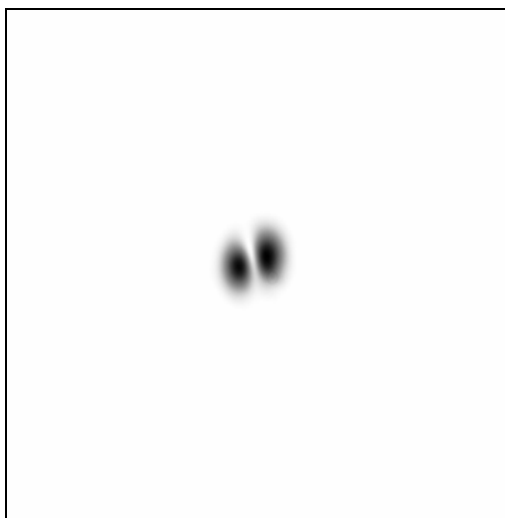


Рис. 14. Распределение интенсивности вышедшего из волокна пучка в дальней зоне

Сохранение структуры распределения интенсивности при распространении пучка свидетельствует о его модовом характере (см. пункт 2 данной статьи).

На выходе оптоволокна энергия моды LP_{11} составляла около 30% от энергии лазера, при энергетической эффективности самого МОДАНа около

38%, из чего можно определить эффективность ввода моды в волокно как порядка 75%.

Были проведены также исследования для более длинного (50 метров) отрезка волокна. Волокно было намотано на барабан. Измерения показали в целом большую нестабильность как для моды LP_{01} , так и для моды LP_{11} . Изменения модового состава происходили с периодом 5-10 секунд, и не было возможности добиться такой же точности юстировок, как для более короткого отрезка волокна.

Заключение

В данной работе получены следующие результаты: исследована возможность применения бинарных амплитудных МОДАНов для селекции LP-мод. Разработана методика измерения поперечно - модового состава излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления и проведены измерения при различных условиях возбуждения. Произведено селективное возбуждение в волоконном световоде моды низшего порядка, отличной от основной, с помощью фазового МОДАНа.

Благодарности

Авторы выражают благодарность R. Poehlman (Институт физических высоких технологий, Йена, Германия) за изготовление амплитудного фильтра.

Литература

1. Голуб М.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Синтез пространственных фильтров для

исследования поперечно-модового состава когерентного излучения // *Квантовая электроника*, 1982. Т. 9. N. 9. С. 1866-1868.

2. V.A. Soifer, M.A. Golub Laser Beam Mode Selection by Computer Generated Holograms // CRC Press, 1994.
3. V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, M. Duparre, R. Kowarschik, B. Luedge, B. Kley Iterative calculation, manufacture and investigation of DOE forming unimodal complex distribution // *Optics and Lasers in Engineering*, 1998. N. 29 С. 269-279.
4. Павелъев В.С., Соифер В.А. Селекция мод лазерного излучения // *Методы компьютерной оптики*. Под ред. В.А. Соифера, Физматлит, М., 2000. Глава 6.
5. Голуб М.А., Карпеев С.В., Кривошлыков С.Г., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Экспериментальное исследование распределения мощности по поперечным модам в волоконном световоде с помощью пространственных фильтров // *Квантовая электроника*, 1984. Т. 11. № 9, С. 1869-1871.
6. F. Dubois, Ph. Emplit, O. Hugon Selective mode excitation in graded-index multimode fiber by a computer-generated optical mask // *Optics Letters*, 1994. V. 19. N. 7. P. 433-435.
7. W.Q. Thornburg, B.J. Corrado, X.D. Zhu Selective launching of higher-order modes into an optical fiber with an optical phase shifter // *Optics Letters*, 1994. V. 19, N 7, P. 454-456.

Analysis and formation of the transverse-mode composition of coherent radiation in a fiber optic waveguide with a stepped refractive index profile using DOE

S.V. Karpeev^{1,2}, V.S. Pavelyev^{1,2}, M. Duparre³, B. Lüdge³, K. Rokstul³, Z. Schröter⁴

¹Image Processing Systems Institute of RAS

²Samara State Aerospace University

³Institute of Applied Optics, Friedrich Schiller University (Jena, Germany)

⁴Institute for Physical High Technology (Jena, Germany)

Abstract

The tasks related to measuring the power distribution over transverse modes of coherent radiation in optical fibers and excitation of particular transverse modes or their groups in a fiber are of practical importance for the research and development of fiber lasers, sensors, and fiber-optic communication lines. This work analyzes the possibility of selection of LP modes at the output of an optical fiber using binary amplitude MODANs. A technique for measuring the transverse-mode composition of radiation in an optical fiber with a stepped refractive index profile is developed and the measurements are carried out under various excitation conditions. A lowest-order mode, different from the fundamental one, is excited selectively in an optical fiber using a phase MODAN.

Keywords: transverse-mode composition, fiber optic waveguide, DOE, MODAN, fiber laser, sensor, communication line.

Citation: Karpeev SV, Pavelyev VS, Duparre M, Lüdge B, Rokstul K, Schröter Z. Analysis and formation of the transverse-mode composition of coherent radiation in a fiber optic waveguide with a stepped refractive index profile using DOE. *Computer Optics* 2002; 23: 4-9.

References

- [1] Golub MA, Prokhorov AM, Sisakian IN, Soifer VA. Synthesis of spatial filters for investigation of the transverse mode composition of coherent radiation. *Sov J Quantum Electron* 1982; 12(9): 1208-1209.
- [2] Soifer VA, Golub MA. *Laser beam mode selection by computer generated holograms*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1994.
- [3] Pavelyev VS, Soifer VA, Duparre M, Kowarschik R, Luedge B, Kley B. Iterative calculation, manufacture and investigation of DOE forming unimodal complex distribution. *Opt Lasers Eng* 1998; 29(4-5): 269-279.
- [4] Pavelyev VS, Soifer VA. Selection of laser radiation modes [In Russian]. In Book: Soifer VA, ed. *Methods of computer optics*. Ch 6. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2000: 395-469.
- [5] Golub MA, Karpeev SV, Krivoslykov SG, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Spatial filter investigation of the distribution of power between transverse modes in a fiber waveguide. *Sov J Quantum Electron* 1984; 14(9): 1255-1256.
- [6] Dubois F, Emplit Ph, Hugon O. Selective mode excitation in graded-index multimode fiber by a computer-generated optical mask. *Opt Lett* 1994; 19(7): 433-435.
- [7] Thornburg WQ, Corrado BJ, Zhu XD. Selective launching of higher-order modes into an optical fiber with an optical phase shifter. *Opt Lett* 1994; 19(7): 454-456.