

ФАЗОВЫЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ ФИЛЬТР, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ НА ВЫХОДЕ ВОЛОКНА СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, В.В. Котляр
Институт систем обработки изображений РАН
Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Рассматривается использование многопорядкового фазового бинарного дифракционного оптического элемента, согласованного с 32 (дублированными) LP -модами ступенчатого волокна с числом отсечки $V=15$, в качестве фильтра для анализа световых полей на выходе из такого волокна.

Введение

Термин «модовое уплотнение каналов» – mode division multiplexing (MDM) – используется для методов уплотнения каналов передачи информации, где каждая из распространяющихся в волокне пространственная мода рассматривается как отдельный канал, несущий свой сигнал [1, 2].

Существуют различные способы возбуждения мод оптического волокна и их селекции на выходе. Среди методов возбуждения мод невысокого порядка – периодическая деформация (сдавливание squeezing или изгибание microbending) волокна [3-6]. В этом случае происходит перекачка энергии из фундаментальной LP_{01} моды в следующую LP_{11} моду.

Возбуждение LP_{11} мод достигается также с помощью наклонной решетки, записанной в волокне с фоточувствительной средой при интерференции двух пучков лазерного излучения [7-9].

Но более простым, в этом случае, способом является фазовая модуляция. В [10], например, она производилась смещением диэлектрических пластинок, помещенных в волновой фронт гауссова пучка.

Для возбуждения спиральных мод лазерное излучение вводилось в торец волокна под определенным углом и со смещением относительно центра волокна [11-12].

Также моды высокого порядка LP_{m1} формировались с помощью амплитудных оптических масок, в которых закодирована комплексная функция распределения мод [13]. При этом для каждой моды используется отдельная маска, в то время как в [2] предложено использовать аналогичные маски, но производящие одновременно несколько мод в различных дифракционных порядках. Такой элемент можно использовать для параллельного возбуждения мод в наборе волокон, а также для селекции мод на выходе многомодового волокна. Это важный аспект, т.к. селекция мод также является серьезной проблемой и выполняется либо с использованием сложных оптических схем [14, 15], либо только для одной-двух пространственных мод [1, 16].

В работах [17, 18], в частности для селекции мод на выходе ступенчатого волокна, был использован 5-порядковый амплитудный бинарный фильтр, закодированный по методу Ли и согласованный с пятью первыми LP -модами для ступенчатого волокна с числом отсечки $V=5$.

Основной недостаток упомянутых амплитудных элементов – низкая энергетическая эффективность: для кодированных амплитудных голограмм – менее 10% в центральном дифракционном порядке. Если же рассматривается многопорядковый оптический элемент, то эффективность уменьшается во столько же раз, сколько используется полезных порядков. Желание иметь один фильтр, согласованный с достаточно большим (20-30) количеством участвующих в анализе мод, сталкивается с проблемой невозможности детектировать корреляционный пик из-за слишком малого количества энергии, идущей в каждый полезный порядок.

В данной работе рассматривается синтез фазового дифракционного оптического элемента (ДОЭ), позволяющего направлять основную часть падающего пучка (около 80%) в полезную область. Элемент является многопорядковым и формирует одновременно 32 LP -моды, распространяющиеся в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления с числом отсечки $V=15$. Так как данный элемент предназначен в первую очередь для анализа модового состава излучения на выходе оптоволокна, то каждая мода согласована с двумя симметричными дифракционными порядками. В этом случае достигаются две цели: бинарный (наиболее простой в изготовлении) микрорельеф ДОЭ и возможность юстировки элемента по выравниванию симметричных порядков.

Элемент изготовлен с применением технологии электронной литографии и испытан при селекции LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} мод, возбужденных в оптическом волокне с помощью согласованных фазовых масок.

1. Теоретические основы

Для наиболее распространенных коммерческих волокон разность показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n=n_1-n_2$ порядка 0,001-0,005 ($NA=0,055-0,13$), их можно считать слабонаправляющими. Тогда, более чем одна мода имеет одинаковое собственное значение (и скорость распространения). Причем, возможно составить линейную комбинацию гибридных мод, которая имеет линейную поляризацию (LP -моды) и является преимущественно поперечной.

Рассмотрим цилиндрическое оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, которое имеет радиус сердцевины a , радиус оболочки b и показатели преломления n_1 и n_2 ,

соответственно. Электромагнитное поле, распространяющееся в таком волноводе удобно описывать с помощью функций Бесселя [19-21].

Для слабнонаправляющих волокон применима аппроксимация LP -мод:

$$LP_{mq}(r, \varphi) = \begin{cases} \cos(m\varphi) \\ \sin(m\varphi) \end{cases} \begin{cases} \frac{J_m(u_{mq}r/a)}{J_m(u_{mq})}, & 0 \leq r \leq a, \\ \frac{K_m(u_{mq}r/a)}{K_m(u_{mq})}, & a \leq r \leq b, \end{cases} \quad (1)$$

где в (r, φ) – полярные поперечные координаты, $J_m(x)$ – функция Бесселя первого рода, $K_m(x)$ – модифицированная функция Бесселя, u_{mq} – корни характеристического уравнения:

$$\frac{uJ_m(u)}{J_{m+1}(u)} + \frac{wK_m(w)}{K_{m+1}(w)} = 0, \quad (2)$$

где $u^2 + w^2 = V^2$, $V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ – число отсечки, λ – длина волны в воздухе.

Число отсечки V , куда входят основные параметры волокна и лазерного излучения, определяет количество распространяющихся в волокне мод. Если $V \leq 2,4$, то волокно будет одномодовым. Так, стандартное ступенчатое оптическое волокно с параметрами $n_1=1,451$, $n_2=1,446$, $a=4,9$ мкм, $b=62,5$ мкм будет одномодовым, если использовать излучение с длиной волны $\lambda=1,55$ мкм. Для меньших длин волн волокно становится многомодовым. Например, при $\lambda=0,633$ мкм и $V \approx 5,8$ в волокне с приведенными выше параметрами кроме фундаментальной моды LP_{01} , будут распространяться также LP_{02} , LP_{11} , LP_{12} , LP_{21} , LP_{31} . Вид некоторых из них приведен на рис. 1.

3. Синтез многопорядкового ДОЭ, согласованного с LP -модами

ДОЭ, формирующие одновременно несколько модовых пучков в разных дифракционных порядках, могут применяться как пространственные фильтры для анализа поперечного модового состава лазерных полей и для одновременного ввода излучения в набор волокон [2, 22].

Если ДОЭ, у которого функция пропускания представлена в виде линейной комбинации ограниченного числа базисных функций $LP_{mq}(r, \varphi)$ с различными несущими пространственными частотами:

$$\tau(r, \varphi) = \sum_{m=0}^M \sum_{q=1}^Q LP_{mq}^*(r, \varphi) \times \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda f} r \rho_{mq} \cos(\varphi - \theta_{mq}) \right], \quad (3)$$

совмещен со сферической линзой, имеющей фокусное расстояние f , и освещен световой волной $w(r, \varphi)$, то интенсивность света в точках фокальной плоскости с координатами (ρ_{mq}, θ_{mq}) будет приближенно пропорциональна квадратам модулей коэффициентов разложения w_{mq} светового поля по этому базису:

$$w(r, \varphi) = \sum_{m=0}^M \sum_{q=1}^Q w_{mq} LP_{mq}(r, \varphi). \quad (4)$$

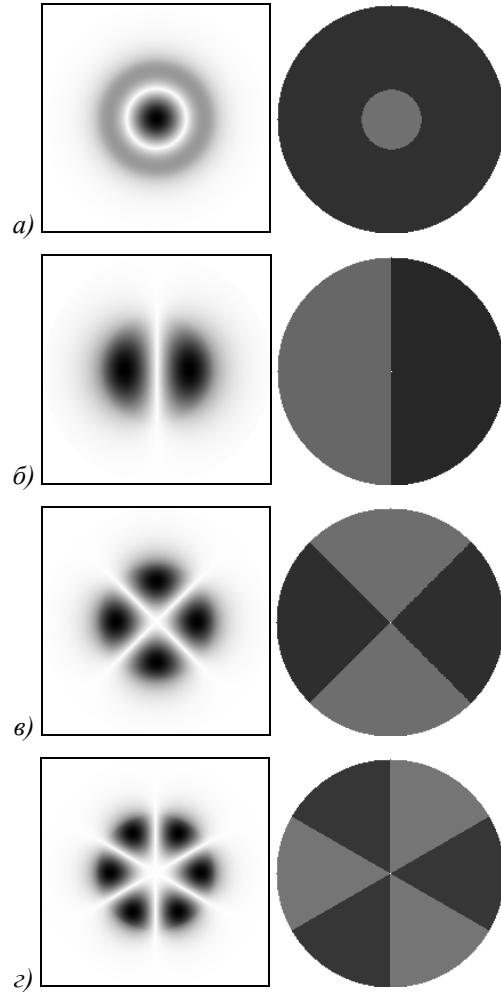


Рис. 1. Распределения поперечной амплитуды (слева – негатив) и фазы (справа – черный цвет соответствует значению фазы 0, серый – π) для мод: LP_{02} (а), LP_{11} (б), LP_{21} (в), LP_{31} (г)

В данной работе в качестве базисных функций в (3) были выбраны LP -моды ступенчатого волокна с числом отсечки $V=15$. В этом случае, кроме фундаментальной, распространяются еще 32 моды с индексами $m = \overline{0,11}$, $q = \overline{1,5}$. Схема расположения порядков дифракции в координатах (ρ_{mq}, θ_{mq}) в соответствии с индексами мод (m, q) приведена на рис. 2а. На рис. 2а показана только верхняя часть. Нижняя половина является симметричным отражением верхней, т.е., каждая мода согласована с двумя симметричными дифракционными порядками. Такое удвоение понижает дифракционную эффективность каждого отдельного порядка в два раза. В данном случае это не является негативным фактором, т.к. данный элемент предназначен для анализа модового состава световых полей, а не для ввода излучения в волокно. И в этом случае более важной характеристикой является точность анализа поля.

Комплексная амплитуда пропускания ДОЭ, полученная по формуле (3), была закодирована в чисто фазовое распределение с помощью метода частичного кодирования [23] с 8 уровнями квантования амплитуды. Однако при изготовлении многоуровневых элементов вероятность технологических погрешностей выше, чем для бинарных элементов. Введение дополнительных (симметричных) порядков и увеличение размерности маски позволило провести бинарное кодирование [23] без потери расчетной точности по сравнению с 8-уровневым кодированием. Наличие симметричных порядков также облегчает юстировку элемента при анализе лазерных полей.

На рис. 2б показана бинарная фаза 64-порядкового ДОЭ, изготовленного по технологии электронной литографии. Размер ДОЭ $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с шагом дискретности $5 \times 5 \text{ мкм}^2$. Глубина полученного рельефа – 690 нм – очень близка к оптимальной, которая для плавленого кварца ($n=1,4569$) при использовании излучения из He-Ne лазера ($\lambda=632,8 \text{ нм}$) равна 692,5 нм.

На рис. 2 также приведены картины распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы при освещении ДОЭ плоской волной: численное моделирование (рис. 2в) и эксперимент (рис. 2г). Видно хорошее качественное согласование расчетов и эксперимента. Наличие центрального паразитного порядка в экспериментальной картине связано с тем, что размер освещающего пучка был больше размера ДОЭ. Энергия в центральном порядке становится несущественной при согласовании размеров освещающего пучка и ДОЭ.

3. Эксперименты по селекции мод на выходе волокна

Для экспериментального исследования процесса возбуждения мод в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления и их последующей селекции с помощью дифракционных элементов, была собрана установка, оптическая схема которой представлена на рис. 3.

Световой пучок, выходящий из лазера L (в эксперименте использовался He-Ne лазер ЛГН 207А, $\lambda=632,8 \text{ нм}$) освещает бинарный фазовый ДОЭ D_1 , предназначенный для формирования моды Гаусса-Эрмита [24]. Но так как данный элемент содержит только информацию о фазовом портрете определенной моды Гаусса-Эрмита, который для низших мод совпадает с LP-модами ступенчатого волокна, то его можно использовать для возбуждения соответствующей моды волокна. На рис. 4 показан вид под микроскопом элементов, преобразующих освещающий гауссов пучок в моду LP_{11} (рис. 4а) и в моду LP_{21} (рис. 4б) с 80% эффективностью.

Затем, с помощью системы линз L_1, L_2, L_3 пучок фокусируется на входе в оптическое волокно F .

Фокусное расстояние линзы L_1 составляет 60 мм, а линзы L_2 – 30 мм. В качестве линзы L_3 в эксперименте выступал микрообъектив с увеличением 40х.

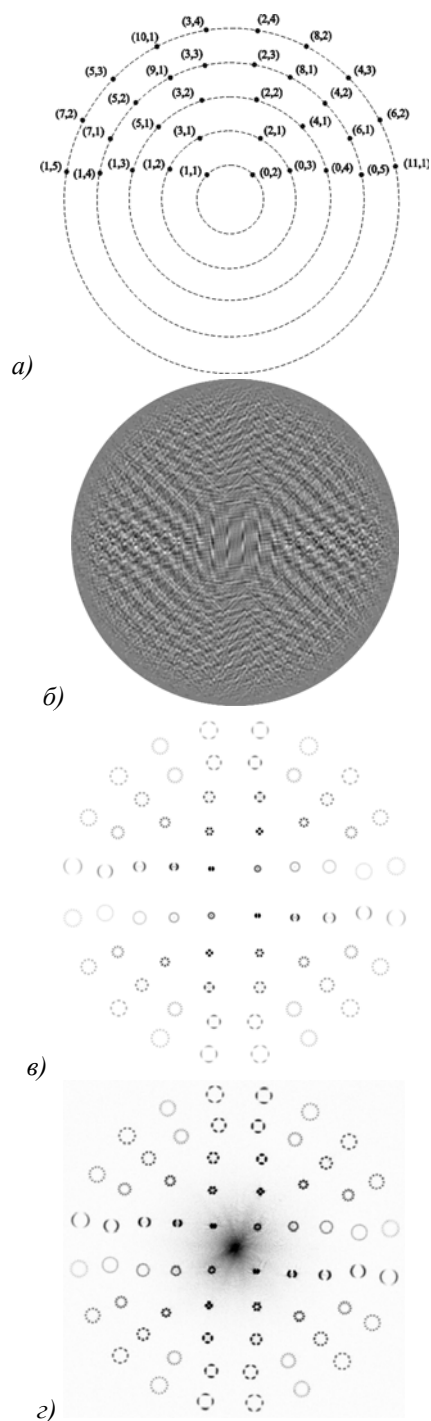


Рис. 2. Схема расположения LP-мод с номерами $m = \overline{0,11}$, $q = \overline{1,5}$ (а), бинарная фаза кодированного 64-порядкового ДОЭ (б), распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы при освещении ДОЭ плоской волной: численное моделирование (в) и эксперимент (г)

Оптическое волокно имеет ступенчатый профиль показателя преломления с диаметром сердцевинки (core) – 9,3 мкм и диаметром оболочки (cladding) – 125 мкм. Числовая апертура – NA 0,3, длина волны отсечки – 1270 нм, предельное значение затухания – 0,25 дБ/км. Длина волокна – 1,5 метра. На торцы волокна вклеены стандартные коннекторы типа FC.

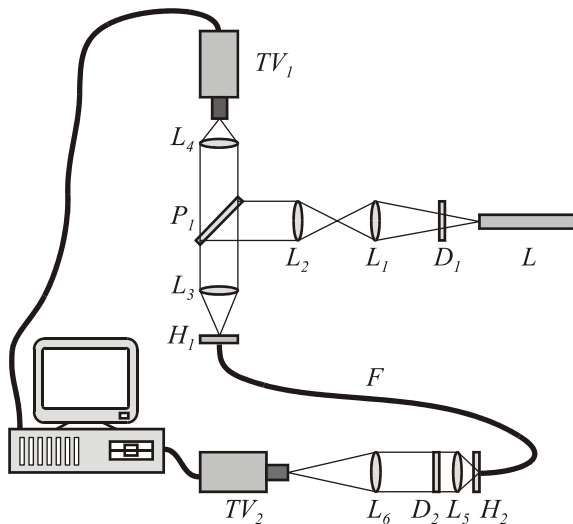


Рис. 3. Оптическая схема эксперимента

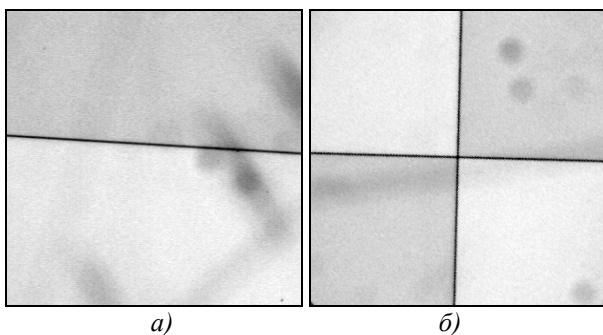


Рис. 4. Вид под микроскопом центральной части ДОО

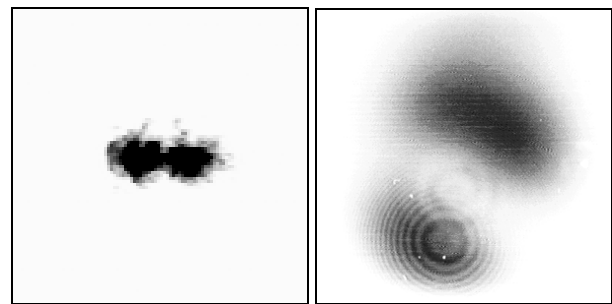
для формирования лазерных пучков, эффективно содержащих моду LP_{11} (а) и моду LP_{21} (б)

Полупрозрачное зеркало P_1 позволяет с помощью линзы L_4 (в эксперименте использовался окуляр микроскопа с увеличением $15\times$) получить изображение пучка на входе в волокно F с помощью телекамеры TV_1 . После выхода из волокна пучок коллимируется линзой L_5 (микрообъектив с увеличением $3,7\times$) и попадает на модовый фильтр D_2 , который осуществляет селекцию мод волокна. Данный фильтр представляет собой бинарный фазовый 64-порядковый ДОО, согласованный с 32 LP -модами ступенчатого волокна и описанный в предыдущем разделе (см. рис. 2).

Далее, линза L_6 (фокусное расстояние линзы составляет 135 мм) формирует изображение картины селекции в плоскости телекамеры TV_2 .

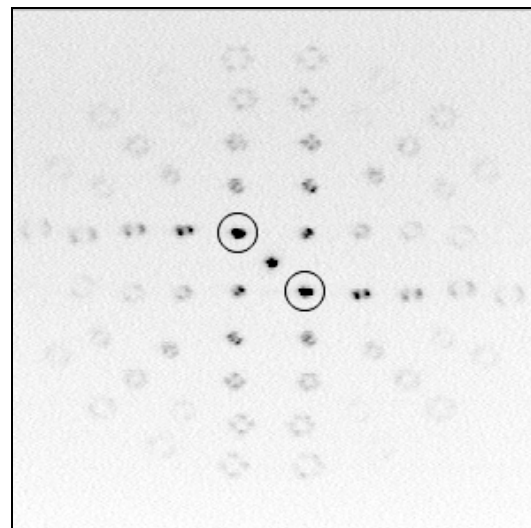
На рис. 5 представлены этапы формирования и прохождения LP_{11} пучка в оптической схеме: пучок на входе в волокно (рис. 5а), на выходе из волокна (рис. 5б) и картина селекции моды с помощью многопорядкового фильтра LP -мод D_2 (рис. 5в). Некоторое искажение светового поля моды на выходе из волокна связано с наличием на торце стандартного FC коннектора. Однако такие искажения не оказывают существенного влияния на обнаружение моды, т.к. при использовании согласованного фильтра основной характеристикой поля является его фазовый портрет. В центрах дифракционных порядков, соот-

ветствующих моде LP_{11} , наблюдаются четкие корреляционные максимумы. Измерения показали, что средняя интенсивность в этих корреляционных максимумах в 3,4 раза выше, чем средняя интенсивность в дифракционных порядках других мод.



а)

б)

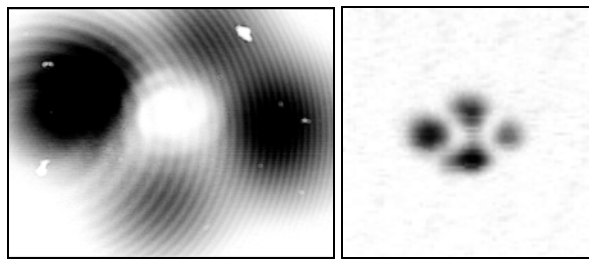


в)

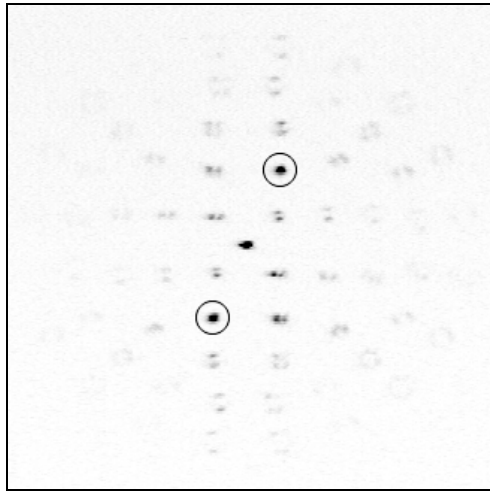
Рис. 5. Распределение интенсивности (негатив) моды LP_{11} на входе в волокно (а), на выходе из волокна (б) и картина селекции этой моды (в)

Аналогичный эксперимент был проведен для моды LP_{21} : на выходе из волокна (рис. 6а) и в фокальной плоскости дополнительно установленной сферической линзы (рис. 6б). Сохранение структуры распределения интенсивности подтверждает модовый характер пучка. На рис.6в приведена картина селекции с помощью многопорядкового фильтра D_2 . В центрах дифракционных порядков, соответствующих моде LP_{21} , наблюдаются корреляционные максимумы, средняя интенсивность в которых в 3,7 раза выше, чем средняя интенсивность других порядков. Столь существенное отличие позволяет эффективно детектировать моду на выходе из волокна.

Процесс возбуждения моды в волокне довольно чувствителен к изгибам волокна. Так, в результате существенного (радиус менее 0,1 м) изгиба волокна изменилась картина селекции (рис. 7). Теперь, как видно из рис. 7, в пучке кроме моды LP_{21} присутствует и мода LP_{11} , т.к. в картине селекции возникли корреляционные максимумы в точках, соответствующих обоим модам.



а) б)



в)

Рис. 6. Распределение интенсивности (негатив) моды LP_{21} на выходе из волокна (а), в фокальной плоскости сферической линзы (б) и картина селекции этой моды (в)

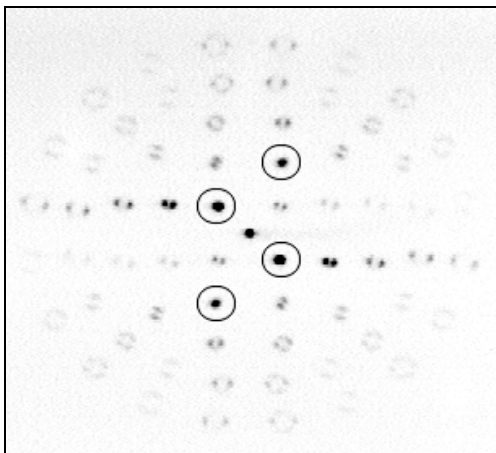


Рис. 7. Картина селекции для моды LP_{21} с изгибом волокна

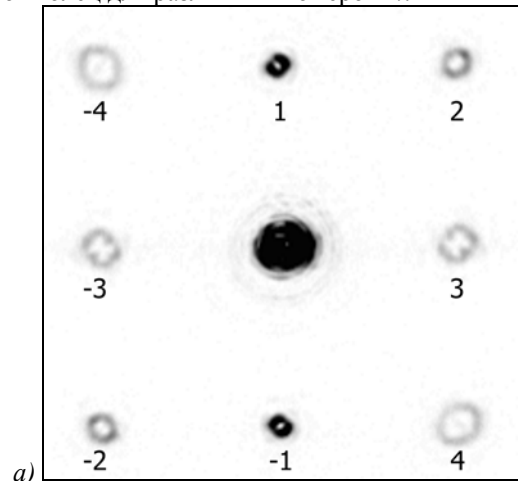
4. Эксперименты по возбуждению винтовых пучков

Световые пучки с винтовыми фазовыми особенностями, т.е. содержащие угловые гармоники вида $\exp(im\varphi)$, также перспективны в области модового уплотнения каналов передачи информации. Например, в работах [25-27] моды Гаусса-Лагерра с различными винтовыми составляющими использовались для увеличения числа информационных каналов в градиентных волокнах. В данном разделе исследована возможность возбуждения винтовых

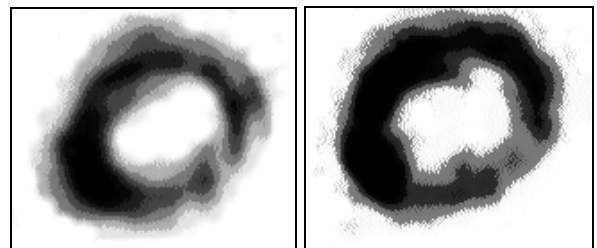
пучков и передачи их по волокну со ступенчатым профилем показателя преломления. Привлекательность уплотнения каналов именно по угловым гармоникам, а не по определенным модам волокна (гауссовым или бesselевым), состоит в унифицированности (один элемент подходит для различных типов волокон) такого подхода и независимости от размера световых пучков (отпадает необходимость согласования с размером элемента).

Для одновременного формирования нескольких пучков с различными винтовыми составляющими был использован многопорядковый фазовый бинарный ДОЭ, аналогичный рассмотренному в работе [28]. ДОЭ освещался гауссовым пучком, формировалось 8 винтовых пучков, содержащих фазовые составляющие вида $\exp(im\varphi)$, $m=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm 4$, в различных дифракционных порядках. Один из пучков выделялся и направлялся в оптическое волокно.

На рис. 8 показаны винтовые поля в различных дифракционных порядках (а) и на выходе из волокна: для $m=2$ (б) и для $m=4$ (в). Видно, что сохраняется кольцевая структура пучков и соотношение размеров колец для различных номеров m .



а)



б)

в)

Рис. 8. Винтовые поля в различных дифракционных порядках (а) и на выходе из волокна: для $m=2$ (б) и для $m=4$ (в)

Заключение

В работе получены следующие результаты:
– рассчитан и изготовлен 64-порядковый бинарный фазовый ДОЭ, согласованный с 32 пространственными Бesselевыми модами $LP_{mq}(r, \varphi)$ оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и предназначенный для работы с лазерным излучением с длиной волны 632,8 нм;

– экспериментально продемонстрировано возбуждение в многомодовом ступенчатом волокне отдельных мод LP_{11} и LP_{21} , сформированных с помощью бинарных фазовых ДОО, а также селекция этих мод на выходе из волокна с помощью 64-порядкового ДОО;

– экспериментально продемонстрировано возбуждение в многомодовом ступенчатом волокне винтовых пучков, содержащих фазовые составляющие вида $\exp(im\varphi)$, $m=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm 4$.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ №№ МД-209.2003.01 и НШ-1007.2003.1, а также российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» («BRHE»).

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

Литература

1. Berdague S., Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers // *Appl. Optics*, 1982. Vol. 21. P. 1950-1955.
2. Soifer V.A., Golub M.A. Laser beam mode selection by computer-generated holograms // CRC Press, Boca Raton. 1994.
3. Youngquist R. C., Brooks J. L., and Shaw H. J. Two-mode fiber modal coupler // *Opt. Lett.*, 1984. Vol.9(5). P. 177-179.
4. Blake J.N., Kim B.Y., and Shaw H.J. Fiber-optic modal coupler using periodic microbending // *Opt. Lett.*, 1986. Vol. 11(3). P. 177-179.
5. Poole C.D. and Wang S.-C. Bend-induced loss for the higher-order spatial mode in a dual-mode fiber // *Opt. Lett.*, 1993. Vol. 18(20). P. 1712-1714.
6. Kag Hwang In, Hyun Yun Seok and Yoon Kim Byoung Long-period fiber gratings based on periodic microbends // *Opt. Lett.* 1999. Vol. 24(18). P. 1263-1265.
7. Lee K.S. and Erdogan T. Transmissive tilted gratings for LP_{01} -to- LP_{11} mode coupling // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1999, Vol. 11. P. 1286–1288.
8. Shik Lee Kyung and Turan Erdogan Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber gratings // *Appl. Opt.* 2000. Vol. 39(9). P. 1394-1404.
9. Shik Lee Kyung and Turan Erdogan Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber // *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001. Vol. 18(5). P. 1176-1185.
10. Thornburg W.Q., Corrado B.J. and Zhu X. D. Selective launching of higher-order modes into an optical fiber with an optical phase shifter // *Opt. Lett.* 1994. Vol. 19(7). P. 454-456.
11. Poon Andrew W., Chang Richard K., Lock James A. Spiral morphology-dependent resonances in an optical fiber: effects of fiber tilt and focused Gaussian beam illumination // *Opt. Lett.*, 1998. Vol. 23(14), P. 1105-1107.
12. Bolshtyansky M.A., Savchenko A.Yu. and Zel'dovich B.Ya. Use of skew rays in multimode fibers to generate speckle field with nonzero vorticity // *Opt. Lett.*, 1999. Vol. 24(7). P. 433-435.
13. Dubois F., Emplit Ph. and Hugon O. Selective mode excitation in graded-index multimode fiber by a computer-generated optical mask // *Opt. Lett.*, 1994. Vol. 19(7). P. 433-435.
14. Barthelemy A. and Piasecki Subpicosecond temporal display of fiber mode patterns by coherent optical filtering // *Opt. Lett.*, 1981. Vol. 6(6). P. 269-271.
15. Sorin W.V., Kim B.Y. and Shaw H.J. Phase-velocity measurements using prism output coupling for single- and few-mode optical fibers // *Opt. Lett.*, 1986. Vol. 11(2). P. 106-108.
16. Sorin W.V., Kim B.Y., and Shaw H.J. Highly selective evanescent modal filter for two-mode optical fibers // *Opt. Lett.*, 1986. Vol. 11(2). P. 581-583.
17. Карпеев С.В., Павельев В.С., Дюпарре М., Людге Б., Рокштул К., Шротер З. Анализ и формирование поперечно-модового состава когерентного излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при помощи ДОО // *Компьютерная оптика*, 2002. В. 23. С. 4-9.
18. Карпеев С.В., Павельев В.С., Дюпарре М., Людге Б., Шротер З. Возбуждение мод ступенчатого волновода с помощью бинарных фазовых ДОО // *Компьютерная оптика*, 2002. В. 24. С. 99-101.
19. Koshiba M., *Optical waveguide analysis* // McGraw-Hill Inc., New York. 1948.
20. Snyder A.W. and Love J.D. *Optical waveguide theory* // Chapman and Hall, London, 1983.
21. Cherin A.H. *An introduction to optical fiber* // McGraw-Hill, Singapore, 1987.
22. Soifer V.A., ed., *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements* // John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
23. Kotlyar V.V., Khonina S.N., Melekhin A.S., Soifer V.A. Fractional encoding method for spatial filters computation // *Asian Journal of Physics*, 1999. Vol. 8(3). P. 273-286 .
24. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Lautanen J., Honkanen M., Turunen J. Generation of Gauss-Hermite modes using binary DOEs // *Proceedings of SPIE: Photonics Prague'99, Device and Systems*, 2000. Vol. 4016. P. 234-239 .
25. Shinmura Y., Ezoe H., Yoshikawa M. Observation of mode in graded-index optical fibers with bending and cross talk in MDM // *IEICE Trans. Electron.* 1997. E80-C(6). P. 828-830 .
26. Johnson E.G., Stack J., Koehler C. Light coupling by vortex lens into graded index fiber // *J. Light-wave Technology*, 2001. Vol. 19(5). P. 753-758.
27. Chen Y.F., Lan, Y.P., Wang S.C. Generation of Laguerre-Gaussian modes in fiber-coupled laser diode end-pumped lasers // *Appl. Phys.*, 2001. В 77, P. 167-170.
28. Хонина С.Н., Алмазов А.А. Формирование гауссовых пучков с помощью винтовых фазовых ДОО // *Компьютерная оптика*, 2002. В. 24. С. 102-109.