

УДК 535.33.621.373.8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОГЕРЕНТНОГО СВЕТА
С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СОСТОЯНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ
В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

М.В. Большаков, Н.С. Ваганова, Н.Д. Кундикова
e-mail: bmv@susu.ac.ru

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Статья поступила 9 марта 2006 г.

Распространение света в многомодовых оптических волокнах интенсивно исследуются в различных областях науки. Оптимизация схемы оптической накачки волоконного лазера на основе многомодового волокна с накачкой в оболочке требует полного анализа распространения поляризованного света в оптическом многомодовом волокне. [1]. Информация о модовом составе света, распространяющегося в многомодовых оптических волокнах [2] необходима, для компенсации дисперсии мод высокого порядка, для устройств с биением мод и оптической связи в свободном пространстве, использующей волоконные лазеры и усилители [3].

Характер распространения света в оптическом волокне зависит от его состояния поляризации. По этой причине исследование эффектов, возникающих при распространении поляризованного когерентного света в многомодовом волокне, представляют огромный интерес, как для фундаментальных исследований, так и для практического применения.

Произвольное состояние поляризации излучения может быть описано двумя параметрами. Первый — эллиптичность по интенсивности $e = I_a / I_b$, где I_a и I_b — минимальные и максимальные интенсивности эллипса поляризации, второй — ориентация большой оси эллипса поляризации. Эллиптически поляризованный свет можно рассматривать как суперпозицию двух волн с правой и левой круговой поляризацией, относительные интенсивности которых и определяют эллиптичность состояния поляризации:

$$e = \left(\frac{\sqrt{I_R / I_L} - 1}{\sqrt{I_R / I_L} + 1} \right)^2, \quad (1)$$

где I_R — интенсивность волны с правой циркулярной поляризацией; I_L — интенсивность волны с левой циркулярной поляризацией.

Оптический эффект Магнуса [4] заключается в том, что волны с левой и правой циркулярной поляризацией распространяется в многомодовом оптическом волокне по разным траекториям. Если в волокне распространяется излучение с произвольным состоянием поляризации, которое является суперпозицией волн с левой и правой циркулярной поляризацией, то эти две волны будут распространяться в волокне по собственным траекториям, формируя на выходе из волокна две независимые спекл-картины. В соответствии с оптическим эффектом Магнуса эти спекл-картины будут повернуты между собой на некоторый угол φ , величина которого определяется

параметрами оптического волокна, длиной волны λ распространяющегося света и может быть оценена следующим образом:

$$\varphi \approx \frac{n_{co} - n_{cl}}{\pi \rho^2 n_{co}^2} \lambda z. \quad (2)$$

Здесь n_{co} и n_{cl} — показатели преломления сердцевинки волокна и оболочки, ρ — радиус сердцевинки волокна, z — длина волокна. Если угол поворота φ не превышает размер одного спекл-пятнышка, то результирующая спекл-картина будет повернута относительно спекл-картин лево- и право- циркулярно поляризованного света на некоторый угол ψ . Если в волокне распространяется линейно поляризованное излучение, для которого вклад лево- и право- циркулярно поляризованного излучения равны, то $\psi = \varphi/2$. Таким образом, можно ожидать, что каждому соотношению между вкладами левой и правой циркулярно поляризованной составляющей будет соответствовать определенный угол поворота спекл-картины. Угловой размер спекл-пятнышка в спекл-картине определяется числом мод, распространяющихся в волокне — чем больше число мод в волокне, тем меньше размер одного спекл-пятнышка. Увеличение длины волокна не влияет на количество распространяющихся в волокне мод, но приводит, в соответствии с выражением (1), к увеличению угла поворота спекл-картины. Таким образом, для данного волокна должна существовать некоторая предельная длина волокна z_{max} , такая, что если длина волокна $z > z_{max}$, то для этого волокна при изменении вклада право- циркулярно поляризованной составляющей на входе в волокно, на его выходе должен наблюдаться поворот спекл-картины. На длинах волокна $z > z_{max}$ в тех же условиях изменения спекл-картины должны носить нерегулярный характер.

В работе [5] было проведено теоретическое исследование влияния состояния поляризации света на входе в волокно на спекл-картину света, прошедшего через оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Было показано, что для длин волокна $z < z_{max}$ изменение эллиптичности поляризованного света на входе в оптическое волокно приводит к повороту спекл-картины на его выходе, причем угол поворота ψ зависит от величины β — вклада правой циркулярной поляризации в эллиптическое состояние поляризации. Были рассчитаны длины волокна, при которых зависимость $\psi(\beta)$ линейна. Эти длины определяются числом мод, распространяющихся в волокне, и возрастают с увеличением числа мод.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния состояния поляризации на входе в волокно на спекл-картину света, прошедшего через оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления.

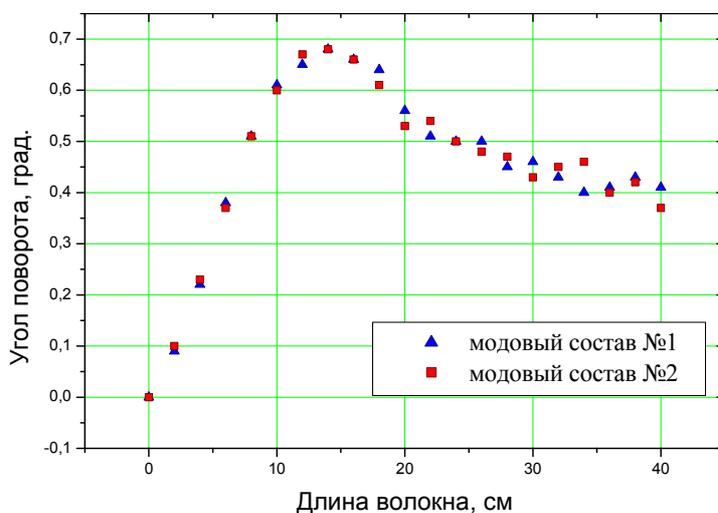


Рис. 1. Зависимость угла поворота спекл-картины от длины волокна для двух различных модовых составов излучения, распространяющегося в волокне

Численное моделирование распространения света с произвольным состоянием поляризации в оптическом волокне определило требования к параметрам волокна для экспериментальных исследований [5]. В соответствии с этими требованиями было выбрано многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления и следующими параметрами: радиус сердцевинки $\rho = 50$ мкм, показатель преломления сердцевинки $n_{co} = 1,47$, разница показателей преломления оболочки n_{cl} и сердцевинки $n_{co} - n_{cl} = \Delta n = 0,016$. В этом волокне отчетливо наблюдается

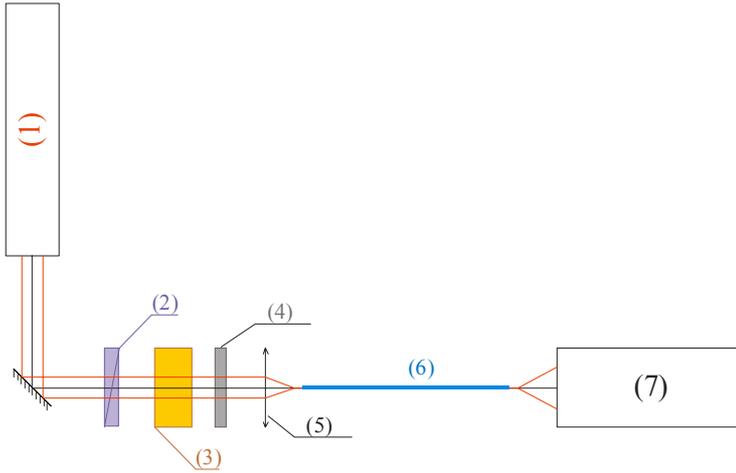


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 — He–Ne лазер; 2 — поляризатор;
 3 — составная перестраиваемая четвертьволновая пластинка;
 4 — нейтральный светофильтр; 5 — микрообъектив;
 6 — многомодовое оптическое волокно; 7 — ПЗС камера

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны два образца волокна различной длины: $z = 15,4$ см (лежит на границе линейности) и $z = 20,5$ см (больше предельной длины).

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Излучение He–Ne лазера 1 с длиной волны $\lambda = 0,633$ мкм проходило через поляризационную систему, состоящую из поляризатора 2 и перестраиваемой четвертьволновой пластинки 3. Линейно поляризованное излучение после поляризатора 2, проходя через четвертьволновую пластинку, преобразовывалось то на выходе из пластинки в эллиптическую поляризацию с разным относительным вкладом левой и правой циркулярной поляризации. Если угол α между азимутом линейной поляризации на входе в пластинку и медленной осью четвертьволновой пластинки равен $\pm 45^\circ$, то из поляризационной системы выходит излучение с левой или правой циркулярной поляризацией. Если азимут линейной поляризации совпадает с одной из собственных осей четвертьволновой пластинки, то вклад левой и правой циркулярной поляризации одинаков. Изменение угла α от -45° до $+45^\circ$ позволяет получить состояние поляризации с любым относительным вкладом левой и правой циркулярной поляризации. Таким образом, поляризационная система позволяла изменять долю света с правой циркулярной поляризацией β в излучении лазера от 0 до 1. Значение $\beta = 0,5$ соответствует линейной поляризации. Излучение ослаблялось фильтром 4 и фокусировалось микрообъективом 5 на вход волокна 6. На выходе из волокна свет попадал непосредственно на активный элемент ПЗС-камеры 7, подключенной к персональному компьютеру, и изображение спекл-картин света на выходе из волокна регистрировалось в цифровом виде, что позволяло использовать программное обеспечение для анализа спекл-картин. В схеме экспериментальной установки предусмотрена возможность введения оптического излучения в волокно под углом к его оси, что позволяет получить кольцевую структуру спекл-картины и увеличить угол поворота [5].

На рис. 3 представлены изображения спекл-картин, полученные на выходе из волокна длиной $z = 15,4$ см и $z = 20,5$ см. Изображения на рис. 3 А соответствуют левой циркулярной поляризации на входе в волокно ($\beta = 0$), изображения на рис. 3 В соответствуют эллиптическому состоянию поляризации на входе в волокно, для которого $\beta = 0,75$.

В образец волокна длиной $z = 15,4$ см излучение вводилось под некоторым углом к оси волокна, поэтому спекл-картины имели кольцевую структуру. Из рис. 3 видно, что характерные особенности спекл-картины при изменении относительного вклада правой циркулярной составляющей сохраняются, визуально отчетливо наблюдался поворот спекл-картины. Присутствие поворота также подтвердила компьютерная обработка изображений, позволившая определить относительный поворот двух спекл-картин. При других состояниях поляризации на входе в волокно изменения спекл-картины также как в расчете несут характер поворота. Это позволило использовать для анализа изменения спекл-картин программное обеспечение, разработанное ранее [6].

оптический эффект Магнуса при выбранных длинах волокна.

В модели, построенной ранее [5], рассматривалось распространение света в волокнах с параметрами, отличными от параметров волокна, выбранного для проведения экспериментальных исследований. Для определения предельной длины волокна и выбора длины волокна для экспериментальных исследований были проведены расчеты для волокна, используемого в экспериментальной работе. На рис. 1 представлена зависимость угла поворота спекл-картины $\psi_{(0)}^{(0,413)}$ от длины волокна

z при изменении величины β от 0 до 0,413 для двух различных модовых составов. Из рис. 1 видно, что для данного волокна критическая длина $z_{\max} \approx 15$ см. Для проведения

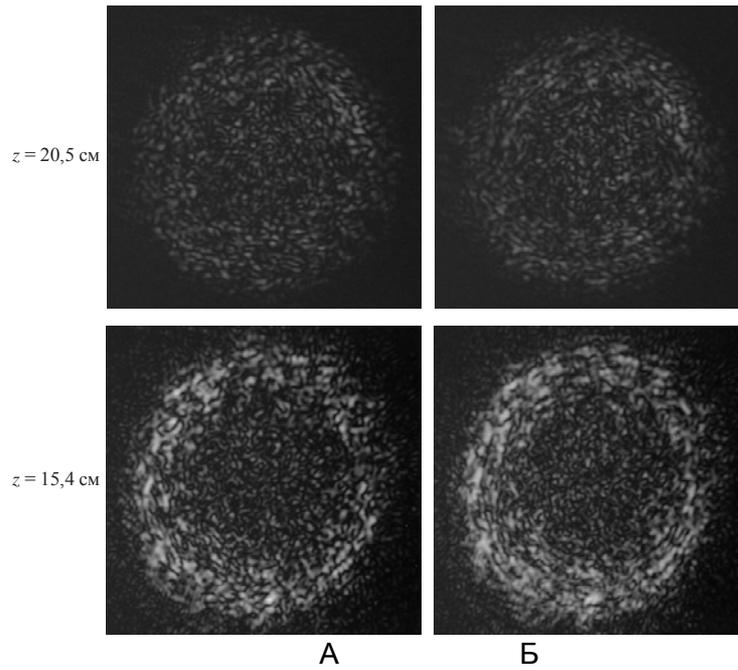


Рис. 3. Изображения спекл-картин излучения с левой круговой поляризацией (А) и эллиптической поляризацией (Б)

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации при длине волокна $z = 15,4$ см для различных модовых составов излучения, распространяющегося в волокне. Как видно из рис. 4, угол поворота монотонно возрастает с увеличением величины β . Это означает, что длина исследуемого волокна не превышает предельную.

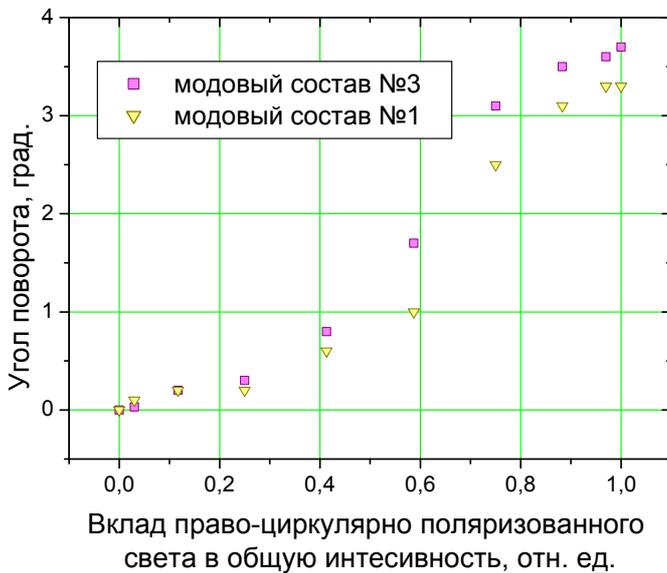


Рис. 4. Экспериментальная зависимость угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации с эллиптичностью e при длине волокна $z = 15,4$ см для различных модовых составов излучения, распространяющегося в волокне

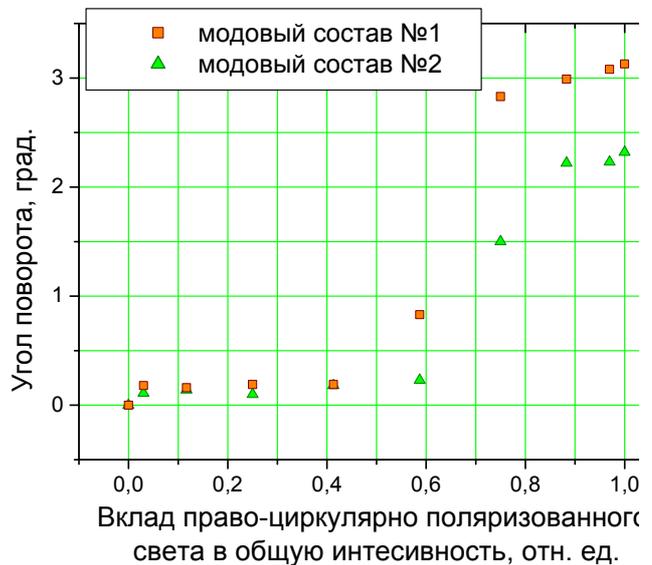


Рис. 5. Экспериментальная зависимость угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации с эллиптичностью e при длине волокна $z = 20,5$ см для различных модовых составов излучения, распространяющегося в волокне

На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации с эллиптичностью e . При этом длина волокна составляла $z = 20,5$ см. Как видно из рис. 5, угол поворота остается практически неизменным в диапазоне величины β от 0 до 0,5, затем быстро возрастает и в диапазоне величин β от 0,8 до 1 практически не изменяется, однако угол поворота зависит от модового состава излучения, распространяющегося в волокне. Ошибка определения угла поворота составляла 0,16 град. Наблюдаемая зависимость $\psi(\beta)$ безусловно, определяется тем, что длина волокна превышает предельную.

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 4 и рис. 5 качественно совпадают с результатами, полученными в работе [4].

Для количественного сравнения теоретических и экспериментальных результатов при помощи модели, разработанной в работе [4], для волокна, используемого в экспериментальных исследованиях, были рассчитаны зависимости угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации с эллиптичностью e при длинах волокна $z = 15,4$ см и $z = 20,5$ см. На рис. 6 и рис. 7 приведены экспериментальная и рассчитанная зависимости угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации при длинах волокна $z = 15,4$ см и $z = 20,5$ см соответственно.

Из рис. 6 и рис. 7 можно видеть количественное совпадение результатов расчета и эксперимента. Это позволяет сделать вывод, что разработанная ранее модель корректно отражает физический процесс распространения света в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. В отличие от компьютерного эксперимента при экспериментальном исследовании волокно длиной $z = 15,4$ см засвечивалось под углом к оси волокна, что позволяло получить кольцевую структуру спекл-картины. Угол поворота кольцевой спекл-картины больше, чем спекл-картины, полученной при обычных условиях засветки [7]. Этим фактом объясняется некоторое превышение экспериментальных значений угла поворота $\psi(\beta)$ над рассчитанными (рис. 6).

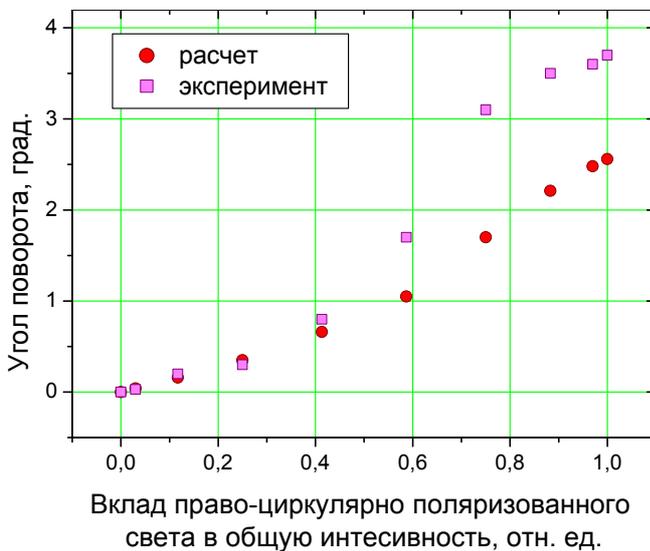


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимости угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации при длине волокна $z = 15,4$ см

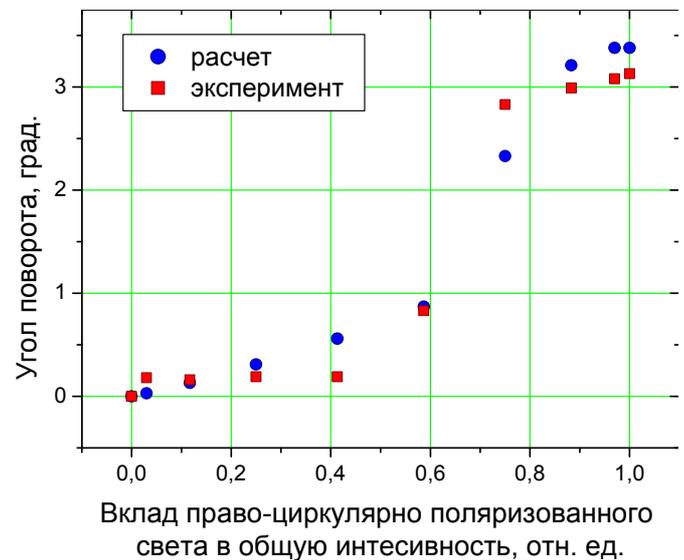


Рис. 7. Экспериментальная и расчетная зависимости угла поворота спекл-картины ψ от вклада света с правой циркулярной поляризацией β в эллиптическое состояние поляризации при длине волокна $z = 20,5$ см

Заключение

Итак, в результате проделанной работы экспериментально показано, что спекл-картина эллиптически поляризованного света, прошедшего через многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления поворачивается при изменении доли правой циркулярно поляризованной составляющей. Угол поворота монотонно увеличивается с увеличением вклада право циркулярно поляризованной составляющей, если длина волокна не превышает предельную. Получено хорошее соответствие между результатами эксперимента и расчета. Таким образом, полученные результаты доказывают принципиальную возможность создания волоконно-оптического датчика изменения эллиптичности когерентного света.

Работа выполнена при поддержке гранта ФЦП «Интеграция» № И0400.

Список литературы

1. Snitzer E., Po H., Hakimi F., Tumminelli R., Mc-Collum B. C. Double-clad, offset core Nd fiber laser, in Conference on Optical Fiber Sensors // New Orleans, January 25—28, 1988, Postdeadline paper PD5.
2. Soo Soh D.B., Nilsson J., Baek S., Codemard C., Jeong Y., Philippov V. Modal power decomposition of beam intensity profiles into linearly polarized modes of multimode optical fibers // J. Opt. Soc. Am. A, 2004. Vol. 21. P. 1241—1250.
3. Weber T., Luthy W., Weber H.P., Neuman V., Berthou H., Kotrotsios G., Dan J.P., Hintermann H.E. Cladding-pumped fiber laser // IEEE J. Quantum Electron, 1995. Vol. 31. P. 326—329.
4. Dooghin A.V., Kundikova N.D., Liberman V.S., Zel'dovich B.Ya. Optical Magnus effect // Phys. Rev., 1992. Vol. 45. P. 8204—8206.
5. Большаков М.В., Кундикова Н.Д. Влияние состояния поляризации света, прошедшего через оптическое волокно на спекл-картину // Известия Челябинского научного центра УрО РАН, 2003. № 4. С. 26—31. http://csc.ac.ru/news/2003_4/2003_4_3_3.zip
6. Anikeev V.V., Bolshakov M.V., Kundikova N.D., Valeyev A.I., Zinatulin V.S. The influence of a magnetic longitudinal field on the behavior of the speckle-pattern of the light, transmitted through optical fiber // XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, "ICONO 2001". Minsk, Belarus, June 26—July 1, 2001. Technical Digest, ThP3.
7. Зельдович Б.Я., Катаевская И.В., Кундикова Н.Д. Неоднородность оптического эффекта Магнуса // Квантовая электроника, 1996. Т. 23. С. 89—90.