

УДК 535.33.621.373.8

НОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА МАГНУСА

С.А. АССЕЛЬБОРН (1), М.В. БОЛЬШАКОВ (1), Н.Д. КУНДИКОВА (1), И.И. НАУМОВА (2)
e-mail: knd@susu.ac.ru

(1) Вузовско-академическая лаборатория нелинейной оптики ИЭФ УрО РАН и ЮУрГУ,
г. Челябинск, Россия

(2) Московский государственный университет, г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 18 июля 2003 года

При распространении света в оптически неоднородной среде в результате взаимодействия спина фотона (поляризации) и его орбитального момента наблюдается изменение траектории циркулярно-поляризованных лучей при изменении знака циркулярной поляризации. Такое изменение траектории впервые наблюдалось экспериментально при распространении циркулярно поляризованного света в многомодовом оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. Оно проявлялось в повороте спекл-картины света, прошедшего через оптическое волокно, при смене знака циркулярной поляризации. Этот эффект получил название оптического эффекта Магнуса [1]. Позднее, в работе [2] был произведен более детальный теоретический анализ эффекта и, в частности, для многомодового оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления было показано, что величина эффекта зависит не только от параметров волокна, но и от условий введения света в волокно. В соответствии с [2] угол поворота спекл картины $\Delta\varphi$ определяется следующим соотношением:

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda\alpha^2 z}{\pi n_{co}^3 \rho^2}, \quad (1)$$

где λ – длина волны света, z – длина световода, n_{co} – показатель преломления сердцевины световода, ρ – радиус сердцевины, α – угол между осью световода и направлением распространения луча, падающего на вход световода.

Экспериментально зависимость угла поворота спекл-картины от угла α при неизменных остальных параметрах исследовалась в работе [3]. Изображение спекл-картины регистрировалось при помощи ПЗС-матрицы. Для определения угла поворота спекл-картины использовалось два независимых метода обработки изображений. Полученные экспериментальные результаты имели невысокую точность, а сама процедура определения угла поворота была достаточно трудоемкой.

В настоящей работе предлагается использовать обращатель волнового фронта в качестве эффективного инструмента для исследования оптического эффекта Магнуса. Необходимость применения нового метода вызвана сложностью и большой трудоемкостью ранее используемых методов определения угла поворота спекл-картины излучения, выходящего из многомодового оптического волокна циркулярно поляризованного света при смене знака циркулярной поляризации [3]. Сложности возникают из-за того, что спекл-картина состоит из большого количества мелких пятен, изменение положения которых на величину, большую их размера сложно заметить визуально. При обращении волнового фронта спекл-картины происходит инвертирование процесса распространения света в волокне, в результате

чего можно на выходе из волокна получить одно пятнышко, которое является плоской волной, распространяющейся в обратном направлении, и, изменяя знак циркулярной поляризации обращенного спекла, наблюдать обусловленный оптическим эффектом Магнуса поворот единственного пятна вокруг оси волокна. Таким образом, использование данного метода даст возможность работать с одним единственным пятном, изменение положения которого в плоскости регистрирующего прибора и определит величину эффекта при разных условиях. Впервые идея использования обращения волнового фронта для наблюдения оптического эффекта Магнуса была предложена и экспериментально реализована Дарштом М.Я. в работе [4].

Цель данной работы — экспериментальная реализация обращателя волнового фронта спекл-картины многомодового оптического волновода и исследование неоднородности оптического эффекта Магнуса с использованием этого обращателя.

Задачу обращения волнового фронта можно решить с помощью сред, способных "запоминать" пространственное распределение интенсивности светового поля [5]. В частности, такими средами являются фоторефрактивные кристаллы [6]. Голограммы, записанные в данных кристаллах, являются динамическими. В динамической голографии обращение волнового фронта лазерного излучения в схеме четырехволнового смещения происходит в "реальном времени" в том смысле, что характеристики обращенной волны изменяются во времени вместе с характеристиками сигнальной волны, что дает большие преимущества в работе с обращающими зеркалами на базе фоторефрактивных сред.

В работе использовалось многомодовое оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Длина волокна — $z = 158$ мм, радиус сердцевинки — $\rho = 50$ мкм. Разница показателей преломления сердцевинки (n_{co}) и оболочки (n_{cl}) $\delta n = n_{co} - n_{cl} = 0,016$. В качестве нелинейной среды для обращателя волнового фронта был выбран фоторефрактивный кристалл ниобата бария-натрия $Ba_2NaNb_5O_{15}$ (BNN) размером $3.5 \times 5 \times 7.5$ мм³. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучение гелий-неонового лазера Л1 делилось полупрозрачным зеркалом 1 на опорный I_0 и сигнальный I_{s0} пучки. Сигнальный пучок с помощью длиннофокусной линзы 3 вводился в многомодовое волокно под некоторым углом α к оси волокна. На выходе наблюдалась спекл-картина в виде кольца с центром на оси волокна. С помощью объектива 4 спекл-картина фокусировалась таким образом, чтобы ее диаметр примерно совпадал с диаметром опорного пучка при их пересечении в кристалле 8. Интерферируя в фоторефрактивном кристалле, эти пучки записывали голографическую решетку. Запись решетки в кристалле производилась во внешнем переменном синусоидальном поле ($\nu = 50$ Гц, $E_0 = 4,5$ кВ/см). Предварительно был проведен вспомогательный эксперимент, в результате которого было установлено, что для плоских волн дифракционная эффективность решетки, записанной при таких условиях, во-первых, максимальна, а, во-вторых, слабо зависит от пространственной частоты q , если q лежит в пределах $3 \dots 4 \cdot 10^4$ см⁻¹. Поэтому выбранное значение угла между сигнальным и опорным пучками составляло 21° ($q = 3,6 \cdot 10^4$ см⁻¹). Максимум дифракционной эффективности был необходим для получения максимальной интенсивности обращенной волны. Слабая зависимость дифракционной эффективности от пространственной частоты позволяла снизить возможные искажения обращенной волны, вызванные присутствием в обрабатываемой волне волновых векторов k с неодинаковыми направлениями.

Экспериментально было обнаружено, что излучение с линейной и циркулярной поляризацией при распространении через волокно ведет себя по-разному. Линейная поляризация не сохраняется, а циркулярная поляризация сохраняется. Для преобразования поляризации света из линейной в циркулярную на входе в волокно и, обратно, из циркулярной в линейную — на выходе, использовались две составные перестраиваемые слюденные пластинки $\lambda/4$ [7], обозначенные в схеме 5 и 6.

Для получения волны, обращенной к сигнальной, записываемая в кристалле голограмма освещалась встречной волной с плоским волновым фронтом I_0^I (использовалось излучение гелий-неонового лазера Л2). Так как волна I_0^I не являлась когерентной с I_0 и I_{s0} , это позволило избежать записи решеток, возникающих при интерференции встречных волн. Интенсивности сигнальной волны и волны накачки совпадали, а интенсивность волны I_0^I была в 15 раз больше. Все волны на входе в кристалл были линейно поляризованными. Плоскость поляризации совпадала с плоскостью падения лучей.

Волна I_0^I , дифрагируя на записанной решетке, порождала волну, идентичную объектной I_{s0} , но

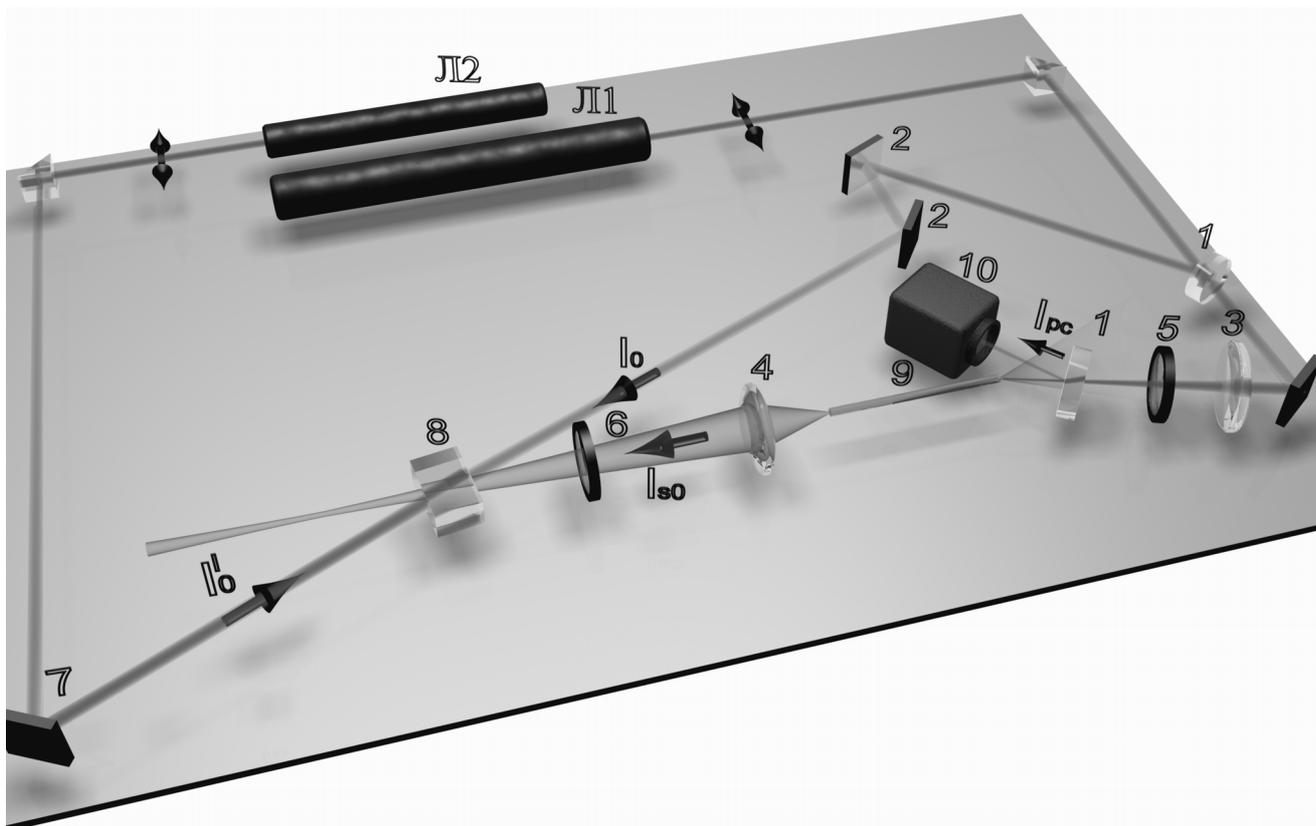


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. (1–полупрозрачное зеркало; 2,7–глухие зеркала; 3–линза; 4–объектив; 5,6–четвертьволновые пластинки; 8–кристалл ВNN; 9–оптический волновод; 10–ПЗС-матрица; Л1,Л2–He-Ne лазер).

распространяющуюся в обратном направлении сначала через пластинку 6, а затем по тому же пути через волокно. В результате за волокном наблюдалась плоская обращенная волна I_{pc} , распространяющаяся навстречу сигнальной. Надо заметить, что яркий обращенный пучок за волокном был виден на фоне менее яркой спекл-картины, которая возникала из-за неидеального качества обращения, а также из-за возможных потерь и искажений в сигнальной волне при распространении через волокно (частичная потеря информации о сигнальной волне). Для регистрации обращенной волны было установлено полупрозрачное зеркало 1, которое отводило ее в сторону ПЗС-матрицы. Зарегистрированное ПЗС-матрицей изображение обращенной волны показано на рис. 2.

Оптический эффект Магнуса для обращенной волны наблюдался при двух различных экспериментальных условиях. В первом случае наблюдение проходило в процессе стирания голограммы. На входе в волокно изменялся знак циркулярной поляризации обращенной волны, и на выходе наблюдалось изменение положения (поворот) пучка I_{pc} относительно оси волокна. Знак циркулярной поляризации изменялся поворотом пластинки 6 на 90° вокруг оси, перпендикулярной ее поверхности. В результате голограмма, записанная в кристалле, постепенно стиралась, и интенсивность повернутого пучка со временем уменьшалась. Во втором случае процесс наблюдения оптического эффекта Магнуса не влек за собой стирания голограммы [4]. Известно, что линейную поляризацию можно рассматривать как суперпозицию двух циркулярных — левой и правой. Поэтому если на вход волокна подать линейно поляризованное излучение, то при распространении через волокно волны с правоциркулярной и левоциркулярной поляризацией будут вести себя независимо, и на выходе появятся два обращенных пучка. Один — идущий навстречу сигнальному, другой — повернутый на небольшой угол вокруг оси волокна вследствие оптического эффекта Магнуса. Для наблюдения оптического эффекта Магнуса в реальном времени не требовалась установка поляризатора, достаточно было убрать из оптической схемы пластинку 6. При этом обращенная волна на входе в волокно не изменяла своей поляризации (оставалась линейно поляризованной).

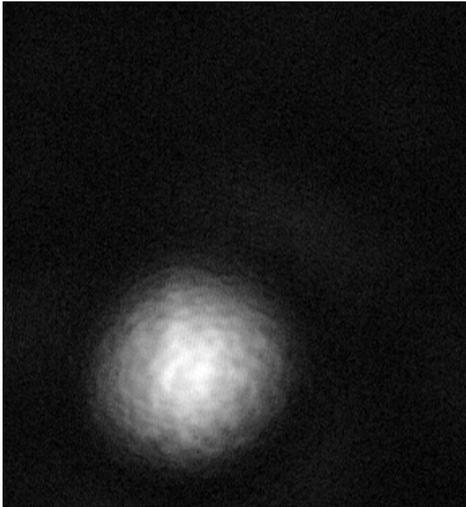


Рис. 2. Изображение отраженной волны, зарегистрированной ПЗС–матрицей, на выходе из волокна.

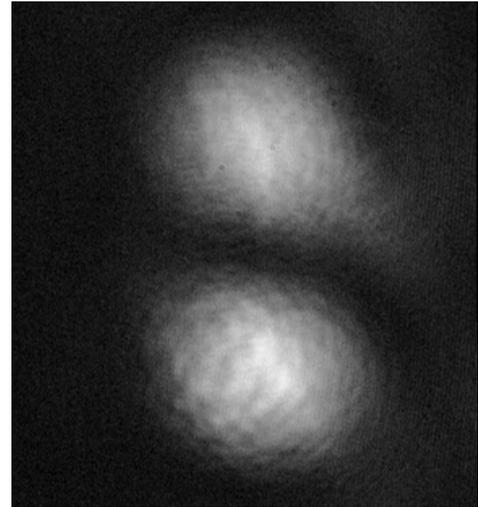


Рис. 3. Изображение отраженной волны, зарегистрированной ПЗС–матрицей, на выходе из волокна в случае, если отраженная волна имеет линейную поляризацию.

На рис. 3 показано изображение, регистрируемое ПЗС–матрицей при угле $\alpha \approx 12^\circ$. Нижнее пятнышко — отраженная волна, верхнее — волна, повернутая вследствие оптического эффекта Магнуса.

Угол поворота спекл-картины при разных углах вхождения света в волокно определялся следующим образом. Сигнальный пучок вводился в волокно длиннофокусной линзой под некоторым углом α к оси волокна. Величина угла α определялась по радиусу спекл-картины. Затем излучение, выходящее из волокна, обращалось. На ПЗС–матрице наблюдалось изображение двух пучков (использовался второй способ наблюдения оптического эффекта Магнуса). Расстояние между пучками h (в пикселях) определялось при помощи программы, строящей зависимость интенсивности от координаты по выбранному направлению. На основе простых геометрических соотношений

$$\varphi/2 = \arctan \frac{H}{2R}, \quad (2)$$

$$R = l \cdot \sin \alpha,$$

где H — расстояние между пучками (в миллиметрах), R — радиус кольцевой спекл-картины, l — расстояние от камеры до торца волокна, была получена следующая формула для определения угла поворота φ :

$$\varphi = 2 \arctan \frac{H}{2l \cdot \sin \alpha}. \quad (3)$$

Измерение величин H и l позволило по формуле (3) получить значение угла φ при заданной величине угла α .

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость угла поворота φ спекл-картины от угла α . Из рисунка видно, что экспериментальные точки с достаточно малым разбросом укладываются на прямую $\varphi = \gamma \alpha^2$, где $\gamma = \text{const}$. Данная прямая получена в результате линейной аппроксимации экспериментальных точек методом наименьших квадратов. Угловой коэффициент прямой $\gamma = 0,0351 \pm 0,0005$. Точность, с которой получено значение коэффициента γ , характеризует точность используемого метода. Теоретическое значение γ_{theor} можно определить из соотношения (1):

$$\gamma_{\text{theor}} = \frac{\lambda z}{\pi n_{\text{co}}^3 \rho^2}. \quad (4)$$

Подстановка в выражение (4) параметров волокна дает значение $\gamma_{\text{theor}} = 0,06996 = 2 \cdot 0,03498$. Таким образом, γ и γ_{theor} с большой точностью отличаются в два раза. Выражение (1) получено в работе [2],

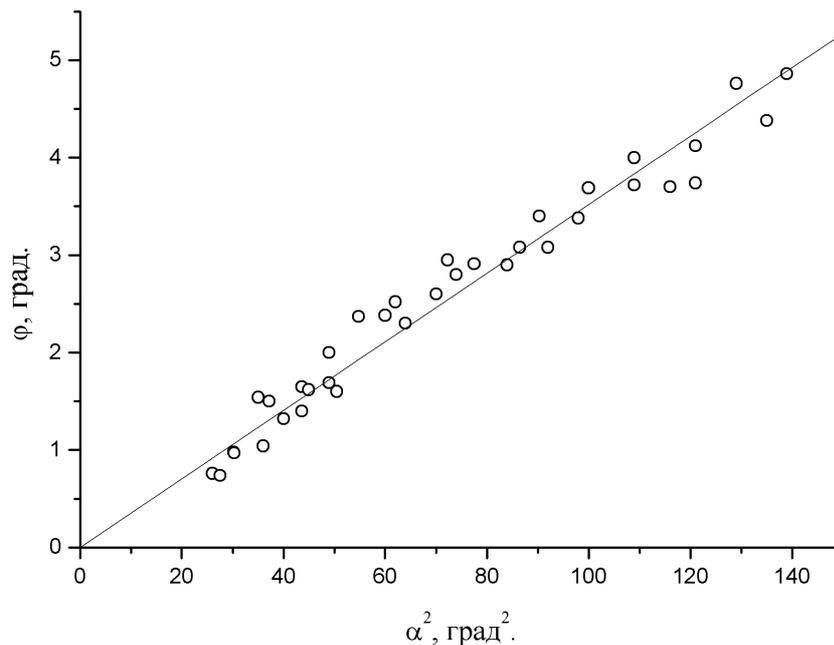


Рис. 4. Зависимость угла поворота φ спекл-картины от угла падения узкого светового пучка на торец волокна, α .

в рамках геометрической оптики. В этой же работе подчеркивается, что хотя законы геометрической оптики перестают работать при распространении света в оптическом волокне из-за дифракции на очень малом расстоянии от входа в волокно, используемый подход достаточно хорошо описывает распространение статистической спекл-картины в волокне. Использование нового метода позволило установить, что геометрический подход дает качественную зависимость угла поворота спекл-картины от угла вхождения света в волокно, количественно же результаты с большой точностью отличаются в два раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано обращение волнового фронта спекл-картины многомодового волокна. Разработана методика изучения оптического эффекта Магнуса на основе обращения волнового фронта. Определена зависимость угла поворота спекл-картины от ее радиуса. На основе нового метода показано, что геометрико-оптический подход к распространению поляризованного света в многомодовом оптическом волокне дает только качественное описание особенностей спин-орбитального взаимодействия фотона.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. V. Dooghin, N. D. Kundikova, V. S. Liberman, B. Ya. Zel'dovich. – Optical Magnus effect// Phys. Rev., 1992. V. 45. P. 8204-8206.
2. V. S. Liberman, B. Ya. Zel'dovich. – Spin-orbit polarisation effects in isotropic multimode fibres// Pure Appl. Opt., 1993. V. 2. P. 367-382.
3. Б. Я. Зельдович, И. В. Катаевская Н. Д. Кундикова. – Неоднородность оптического эффекта Магнуса// Квантовая электроника, 1996. V. 23. P. 89-90.
4. М. Я. Даршт, Б. Я. Зельдович, Р. Коваршик, Н. Д. Кундикова. – Поворот изображения в многомодовом оптическом волокне при смене знака циркулярной поляризации// Известия Челябинского научного центра, 2003. № 2. С. 10-14.
5. Б. Я. Зельдович, Н. Ф. Пилипецкий, В. В. Шкунов. – Обращение волнового фронта// М.: Наука, 1985. 248 с.
6. М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике// М.: Наука, 1992. 317 с.
7. Goltser I.V., Darsht M.Ya., Kundikova N.D., Zel'dovich B.Ya. – An adjustable quarter-wave plate// Opt. Commun. 1993. V. 97. № 5-6. P. 291-294.