

УДК 535.2:548.1.022/.024

СМЕЩЕНИЕ МАССИВА БЕССЕЛЬ-ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ, ПРОШЕДШИХ ОДНООСНЫЙ КРИСТАЛЛ

Иванов М.О., Зиновьев А.О., Коноваленко В.Л., Рыбась А.Ф.

*Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: maks.ivannov@gmail.com*

Был получен и проанализирован массив Бессель-Гауссовых пучков, прошедших одноосный кристалл, как совокупность наклонных пучков. Определена зависимость углового смещения парциальных пучков от параметров исходного пучка Бесселя и экранирующей диафрагмы. Определены оптимальные условия (количество пучков и их относительный диаметр) получения, максимально эффективного углового смещения.

Ключевые слова: оптические вихри, недифрагирующие пучки.

ВВЕДЕНИЕ

Главной особенностью оптического вихря является то, что он может переносить орбитальный угловой момент, который в общем случае состоит из спиновой и орбитальной компонент. Оптические вихри обладают угловым моментом необходимым при захвате и переносе частиц. Для управления микрочастицами необходимо создать пучок с большим значением углового момента. Для этих целей подходят пучки Бессель-Гаусса, которые, в отличие от гауссовых пучков, переносящих классические вихри, более устойчивы к возмущениям при распространении.

1. УГЛОВОЙ МОМЕНТ СВЕТОВОГО ПУЧКА. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ПРОЕКЦИИ УГЛОВОГО МОМЕНТА

Для параксиальных пучков, распространяющихся в свободном пространстве или изотропной однородной среде, возможно, формально разделить угловой момент на спиновую и орбитальную части [1]. В процессе распространения через среду угловой момент пучка может изменяться. Постоянной величиной относительно распространения остается не сам угловой момент, а его поток [2].

Теорема о сохранении потока углового момента формулируется для свободного пространства или изотропной однородной среды для параксиальных пучков. Сохраняющейся величиной является отношение компоненты углового момента M_z (z – направление распространения пучка) к полному потоку энергии пучка в этом направлении.

$$\frac{M_z}{\mathfrak{E}} = \frac{\frac{1}{c^2} \int_{S_\infty} [\mathbf{r} \times \mathbf{P}]_z dS}{\int_{S_\infty} P_z dS} = L_z + S_z = const, \quad (1)$$

где c - скорость света в вакууме, \mathbf{r} - радиус-вектор, \mathbf{P} - вектор Пойнтинга, L_z, S_z - удельные орбитальный и спиновый угловые моменты в z направлении, интегрирование ведется по площади поперечного сечения.

В отличие от изотропной среды (или свободного пространства) в анизотропной среде нарушается закон сохранения углового момента как суммы спинового и орбитального момента.

Чиаттони в своей работе [3] пришел к выводу, что усредненный по времени полный поток углового момента Φ вдоль оси z является инвариантом пучка, т.е. сохраняется и не зависит от координаты z :

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_L + \Phi_S = \text{const} \\ \frac{d\Phi(z)}{dz} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Это значит, что вследствие цилиндрической симметрии одноосного кристалла относительно оптической оси мы можем говорить о сохранении суммы потока проекций орбитального $\Phi_L = \frac{L_z}{I_z}$ и спинового $\Phi_S = \frac{S_z}{I_z}$ моментов на оптическую ось в параксиальном пучке.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В общем случае электромагнитное поле имеет угловой момент [4]:

$$\vec{M} = \frac{1}{c^2} \int_{S_\infty} \vec{r} \times \vec{p} dS, \quad (3)$$

где c - скорость света в вакууме, $\vec{r} = (r_x \vec{e}_x + r_y \vec{e}_y + r_z \vec{e}_z)$ - радиус вектор,

$\vec{p} = \frac{c}{8\pi} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*)$ - вектор Пойнтинга, \vec{E} и \vec{H} - напряженности электрического и

магнитного полей соответственно, $*$ - комплексное сопряжение, S_∞ - указывает на то, что интегрирование ведется по всей площади параксиального пучка.

В начале 30х годов XX века было показано, что циркулярно поляризованный параксиальный пучок переносит спиновый угловой момент [5], т.е. угловой момент, связанный с поляризацией волны. Позднее уже в 90х годах XX века Ален и др. [6,7] показали, что параксиальный световой пучок переносит также орбитальный угловой момент, причем в свободном пространстве сумма проекций орбитального и спинового моментов на направление распространения являются инвариантом волнового движения. В тоже время в квантовой электродинамике строго показано, что спиновой и орбитальный угловой момент фотона нельзя разделить в общем случае на спиновый и орбитальный. Более детальные исследования [8 - 10] показали, что в случае световых пучков следует говорить не об угловом моменте, а о потоке углового момента M_z в заданном направлении. Для параксиальных

пучков Берри М. показал [11], что в свободном пространстве или однородной изотропной среде, поток углового момента параксиального пучка может быть выражен как отношение углового момента к полной интенсивности пучка в данном направлении и описывается выражением:

$$I_z = \frac{\langle \psi | l_z | \psi \rangle + \langle \psi | s_z | \psi \rangle}{\langle \psi | \psi \rangle} \quad (4)$$

Второй член в формуле (4) равен нормированному третьему параметру Стокса:

$$S_z = \frac{S_3}{S_0} = \frac{\langle \psi | s_z | \psi \rangle}{\langle \psi | \psi \rangle} \quad (5)$$

Волновая функция ψ в выражениях (4) и (5) представляет собой поперечные компоненты электрического поля $\psi = \vec{E}_\perp$. Полученная формула позволяет быстро оценить проекцию потока углового момента вдоль направления распространения пучка.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В проделанном эксперименте использовался He-Ne лазер ЛГН-207 А. Вид экспериментальной установки на рис.1.

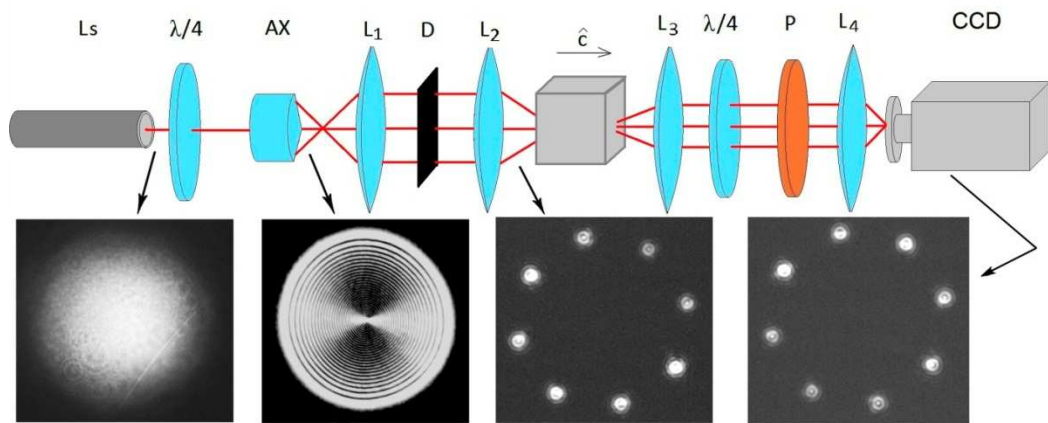


Рис. 1. Вид экспериментальной установки.

Из лазера с длиной волны 0,6328 мкм и линейной поляризацией, луч направлялся на систему оптических элементов. При прохождении через четвертьволновую пластинку $\lambda/4$, луч из линейно-поляризованного преобразовывался в право циркулярно-поляризованный, затем пучок распространялся через коническую линзу (аксикон), где происходила генерация пучка Бессель-Гаусса. После преобразования, Бессель-Гауссовый пучок проходил через линзу L1, преломляясь на ней, параллельный Бессель-Гауссов пучок проецировался на фазовый транспарант D. За фазовым транспарантом была установлена линза L2, после которой Бессель-Гауссовый пучок фокусировался на

входной грани одноосного кристалла LiNbO₃. Выходя из кристалла, пучок собирается при помощи линзы L₃, расположенной таким образом, что бы её фокус совпадал с выходной гранью кристалла. Параллельный пучок обрабатывался дифференциальным Стокс-поляриметром, состоящий из четвертьволновой пластинки и поляризатора, расположенных на вращательных лимбах.

Таким образом, мы могли изменять требуемую компоненту поляризации пучка, которая после поляриметра проецировалась линзой L₄ на вход CCD камеры. Данные с CCD камеры поступают на монитор и персональный компьютер, где фиксируются и обрабатываются.

4. ПОЛУЧЕНИЕ СЕМЕЙСТВ НАКЛОННЫХ ПУЧКОВ

В эксперименте использовался массив бesselевых пучков, получаемый с помощью диафрагм соответствующей формы (рис. 2). Диафрагмы характеризуются относительным диаметром – отношение между диаметрами маленьких колец и диаметра большого кольца, на котором они расположены.

Получаемые картинки распределения интенсивности массива бesselевых пучков приведены на рис. 3.

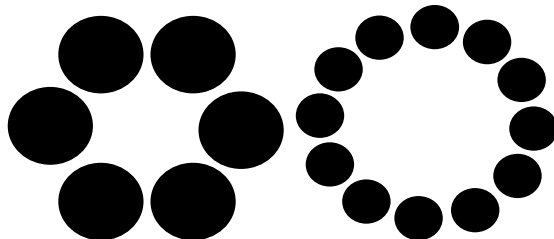


Рис. 2. Примеры диафрагм с 6 и 12 отверстиями соответственно.

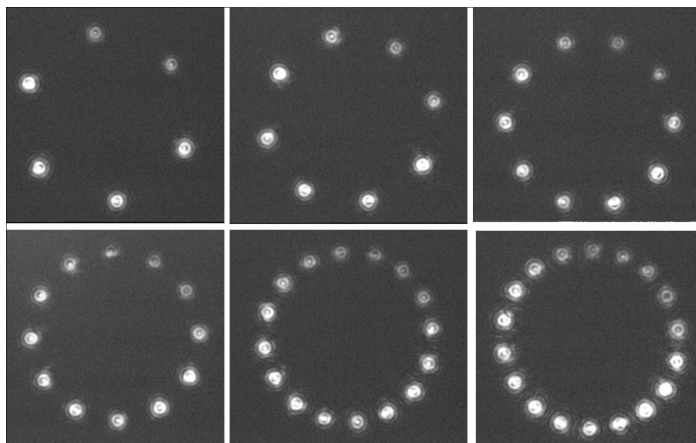


Рис. 3. Картинки распределения интенсивности массива бesselевых пучков, для линзы с перетяжкой пучка – 33,58 микрометра и относительным диаметром 8 и количеством отверстий 6, 8, 10, 12, 16 и 18 соответственно.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА СЕМЕЙСТВА ПУЧКОВ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Для измерения угла поворота были отобраны 4 линзы с перетяжкой пучка – 89,17 мкм, 47,98 мкм, 33,58 мкм и 14,39 мкм, соответственно. Для каждой линзы применялись диафрагмы с относительными диаметрами 6, 8 и 12. Для каждого относительного диаметра – количество отверстий 6, 8, 10, 12, 16 и 18. Для каждой диафрагмы получены по 8 снимков. Величина угла поворота определялась при помощи программы, написанной специально для этих целей. Данные сохраняются и заносятся в таблицу.

Построены графики зависимости угла поворота (ось Y) от количества отверстий (ось X) для трех разных относительных диаметров для положения пластинок $\lambda/4$: первая пластинка под углом $+45^\circ$, вторая -45° (рис.4). Относительный диаметр 6 обозначен черным цветом, 8 – красным, 10 (12) – синим. Для примера приведены графики для линзы с перетяжкой 33,58 мкм.

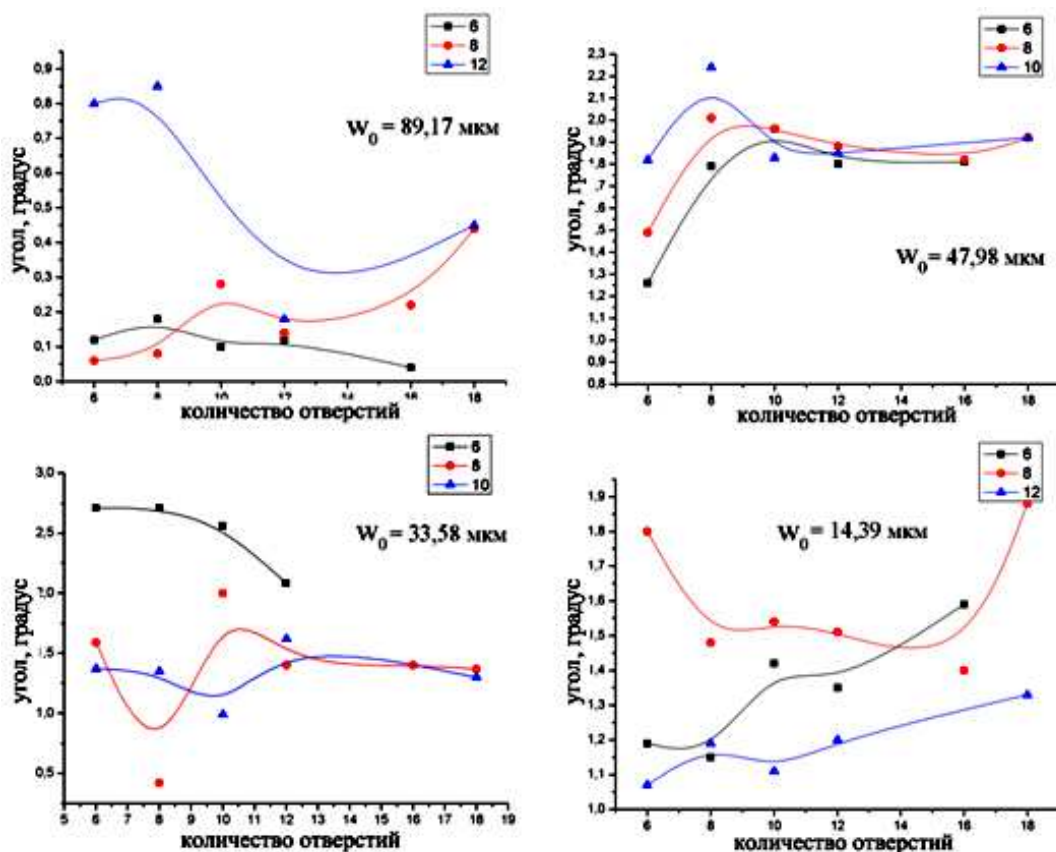


Рис. 4. Графики зависимости угла поворота от количества отверстий на диафрагме для различных перетяжек для относительных диаметров 6, 8, 10 и 12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы, были получены следующие результаты:

1. При прохождении через одноосный кристалл вклад в поток углового момента массива Бесселевых пучков дает только орбитальная компонента углового момента.
2. Получены условия при которых величина бокового смещения максимальна; равная $2,91^\circ$ при относительном диаметре b и количеством отверстий – 12.

Список литературы

1. Allen L. Optical Angular momentum / Allen L., Barnett S.M., Padgett M.J. – Bristol: Institute of Physics Publishing, 2003. – 300 p.
2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика [в 10 т.], Т.8 Электродинамика сплошных сред / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.– М.: Наука , 1982. – 620 с.
3. Ciattoni A. Angular momentum dynamics of a paraxial beam in a uniaxial crystal / Ciattoni C.A., Claudio G.P. // Physical Review E. – 2003. – V. 67. – P. 036618 -1-10.
4. Beth R.A. Mechanical Detection and measurement of the angular momentum of light / Beth R.A. // Physical Review. – 1936. – V. 50. – P. 115-125.
5. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., and Woerdman J.P. // Physical Review A. – 1992. – V. 45. – P. 8185 – 8189.
6. Second-harmonic generation and the orbital angular momentum of light / Dholakia K., Simpson N.B., Padgett M.J. and Allen L. // Physical Review A. – 1996. – V. 54. – P. R3742 - R3745.
7. Orbital angular momentum in low-mode optical fibers and its detection / Alexeyev C.N., Alexeyev A.N., Fridman Yu.A., Volyar A.V. // Proceedings of SPIE. – 1998. – V. 3487. – P. 94-100.
8. Allen L. The Orbital Angular Momentum of Light / Allen L., Padgett M.J., Babiker M. // Progress in optics. – 1999. – V. XXXIX, Elsevier Science B.V. – P. 291-372.
9. Allen L. The Poynting vector in Laguerre-Gaussian beams and the interpretation of their angular momentum density / Allen L., Padgett M.J. // Optics Communications. – 2000. – V. 184. – P. 67-71.
10. Allen L. Optical Angular Momentum / Allen L., Barnett S.M., Padgett M.J. – CRC Press: 2003. – 300 p.
11. Berry M. Paraxial beams of spinning light / Berry M. // Proceedings of SPIE. – 1998. – V. 3487. – P. 6-11.

Зміщення масива Бессель-Гаусових пучків, що пройшли одновісний кристалл / Іванов М.О., Зінов'єв К.О., Коноваленко В.Л., Рибась О.Ф. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2011. – Т. 24(63), №2. – С. 114-119.

Був отриман й проаналізований масив Бессель-Гаусових пучків, що пройшли одновісний кристал, як сукупність похилих пучків. Визначена залежність кутового зміщення парціальних пучків від параметрів початкового пучка Бесселя та екрануючої діафрагми. Визначені оптимальні умови (кількість пучків і їх відносний діаметр) отримання максимально ефективного кутового зміщення.

Ключові слова: оптичні вихори, недифрагуючі пучки.

Displacement of Bessel-gaussian beams array, passed through a uniaxial crystal / Ivanov M., Zinovyev A., Konovalenko V., Rubass A. // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2011 – Vol. 24(63), No.2 – P. 114-119.

Array of the Bessel-Gaussian beams passing a uniaxial crystal was obtained and analyzed as aggregate of inclined beams. Dependence of angular displacement of partial beams on the parameters of initial Bessel beams and diaphragm is obtained. The optimal terms (number of beams and their relative diameter) of receipt of maximally effective angular displacement are obtained.

Key words: Singular optical vortices, nondiffracting beams.

Поступила в редакцію 06.09.2011 г.