Моделирование распространения полиномиальных круговых лазерных пучков

О.А. Дюкарева[1]

[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086*

Аннотация

В данной работе рассмотрены свойства полиномиальных круговых лазерных пучков. Моделирование их распространения проводилось с помощью преобразования Френеля−Ханкеля. На основе полиномиальных пучков сформирована оптическая ловушка, которая может найти практическое применение при оптическом захвате и манипулировании микрочастицами.

Ключевые слова

Преобразование Френеля−Ханкеля, самофокусирующиеся пучки, полиномиальные круговые пучки, оптические ловушки

1. Введение

Оптические пинцеты – инструменты, позволяющие манипулировать микроскопическими частицами. Первый оптический пинцет был основан на пучке Гаусса [1]. В дальнейшем были изучены свойства пучков Бесселя, Лагерра-Гаусса, Эрмита-Гаусса для создания оптических ловушек [2−4]. Например, в работе [4] пучок представляет собой суперпозицию двух мод Лагерра-Гаусса, фазовый сдвиг между которыми подобран так, чтобы при интерференции они взаимоуничтожались в общем фокусе, окруженном по всем направлениям областями высокой интенсивности. Эти области являются световыми барьерами для захваченных микрочастиц.

Оптические ловушки используются для изучения молекулярных двигателей, полимеров и биополимеров. В исследованиях [5] сообщается о больших успехах в применении оптических пинцетов при дифференциации раковых клеток от здоровых.

2. Исследование

В этой работе рассматривается полиномиальный круговой оптический пучок вида:

$$f(r) = \prod_n c_n \exp(ik\alpha_n r^n) \tag{1}$$

где $k = 2\pi/\lambda$ − волновое число для лазерного излучения с длиной волны λ, α_n − положительные действительные числа меньше единицы.

Для моделирования параксиального распространения пучка (1) в свободном пространстве можно использовать преобразование Френеля. Так как входная функция (1) может быть представлена в виде $f(r,\varphi) = A(r)e^{im\varphi}$, где m – целое число, то вместо 2D преобразования Френеля можно использовать преобразование Френеля-Ханкеля в полярных координатах, представимое в виде однократного интеграла:

$$F_m(\rho,\theta,z) = \frac{i^m k}{z} e^{ikz} e^{im\theta} e^{\frac{ik\rho^2}{2z}} \int_0^\infty A(r) e^{\frac{ikr^2}{2z}} J_m\left(\frac{kr\rho}{z}\right) r dr. \tag{2}$$

Функция (1) также обладает осевой симметрией ($m = 0$), следовательно, формируемое поле не зависит от угла. Рассмотрим входное поле в виде дублета из совокупности двух комплексно-сопряженных аксиконов и классической линзы:

$$f(r) = \cos(k\alpha_1 r) \exp(-ik\alpha_2 r^2) \tag{3}$$

где $\alpha_2 = 1/2f_0$, f_0 – фокусное расстояние линзы. Множитель $\cos(k\alpha r)$ представляет собой совокупность рассеивающего аксикона $e^{ik\alpha r}$ (обеспечивает пик на оси после фокуса линзы) и собирающего аксикона $e^{-ik\alpha r}$ (обеспечивает пик на оси до фокуса линзы) [3].

Для классической линзы характерен максимум интенсивности на оптической оси в плоскости фокуса $z = f_0$ (Рисунок 1). При дополнении линзы двумя аксиконами (или просто бинарным аксиконом) на продольной картине интенсивности (Рисунок 2) можно наблюдать формирование оптической бутылки. Наиболее яркие ее точки соответствуют максимумам на оптической оси, в то время как между ними (в фокальной плоскости) имеет место кольцевое распределение интенсивности.

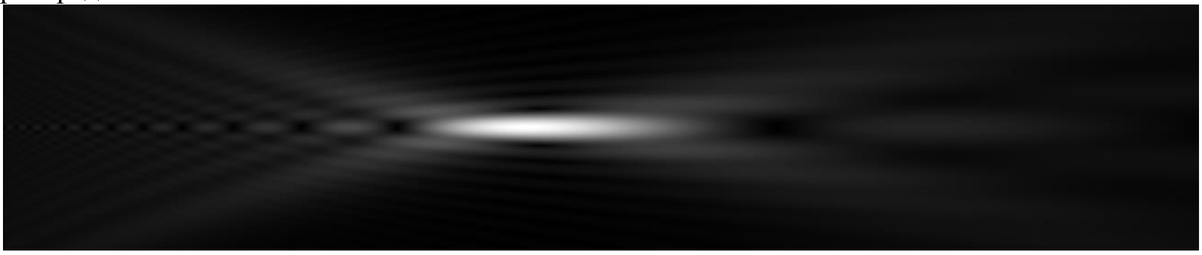

Рисунок 1: Продольная картина интенсивности для классической линзы

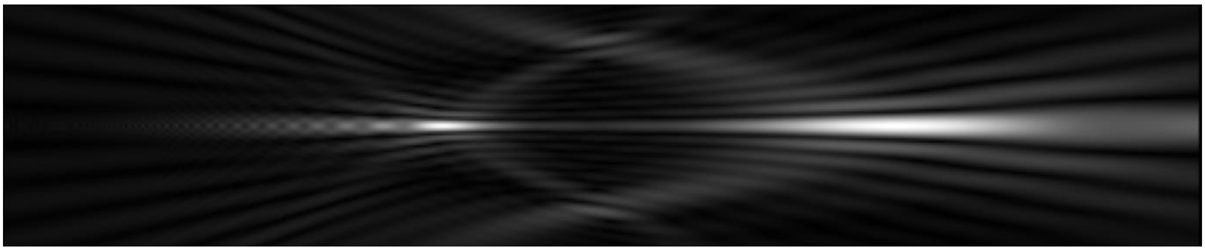

Рисунок 2: Продольная картина интенсивности полиномиального кругового пучка (3)

3. Заключение

В работе рассматриваются свойства полиномиальных круговых лазерных пучков. Показана возможность преобразования полиномиального пучка в оптическую ловушку, что может найти применение в микробиологии, физике коллоидов, атомной физике, микромеханике.

4. Литература

[1] Ashkin, A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers / A. Ashkin // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1997. – Vol. 94. – P. 4853-4860.

[2] McGloin, D. Interfering Bessel beams for optical micromanipulation / D. McGloin, V. Garcés-Chávez, K. Dholakia // Optics Letters. – 2003. – Vol. 28(8). – P. 657-659.

[3] Khonina, S.N. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // Applied Physics B. – 2018. – Vol. 124. – P. 191.

[4] Порфирьев, А.П. Формирование массива световых «бутылок», основанное на использовании суперпозиции пучков Бесселя / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 80-90.

[5] Guck, J. Optical Deformability as an Inherent Cell Marker for Testing Malignant Transformation and Metastatic Competence / J. Guck, S. Schinkinger, B. Lincoln, F. Wottawah, S. Ebert, M. Romeyke, D. Lenz, H. M. Erickson, R. Ananthakrishnan, D. Mitchell, J. Käs, S. Ulvick, C. Bilby // Biophysical Journal. – 2005. – Vol. 88. – P. 3689-3698.