

Градиенты интенсивности многолучевых интерференционных световых полей

А. А. Рыжевич^{1, 2)}, И. В. Балыкин¹⁾, Т. А. Железнякова²⁾

¹⁾ *Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*
e-mail: a.ryzhevich@dragon.bas-net.by

²⁾ *Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

Рассмотрены световые поля, сформированные в результате интерференции N синфазных когерентных плоских волн, имеющих интенсивность I_0/N , распространяющихся под одинаковыми углами к одной оси, направления распространения которых образуют симметричную относительно этой оси картину N -го порядка. Рассчитаны градиенты интенсивности световых полей для количества N интерферирующих волн от 2 до 24. Определены максимальные значения градиента интенсивности при каждом значении N . Получено, что зависимость максимального значения градиента от N близка к прямо пропорциональной. Для воздействия на некую площадь оптимальными являются периодические интерференционные световые поля, которые формируются при $N = 2, 3, 4, 6$. При $N = 5; 7$ формируются квазипериодические световые поля, распределение пиков интенсивности в которых менее равномерно. Начиная с $N = 8$, склоны осевого пика интенсивности обеспечивают значение градиента интенсивности, сильно превосходящее градиенты для остальных пиков интенсивности, из-за чего такие поля оптимальны для точечного воздействия на единичные микрообъекты.

Ключевые слова: градиент интенсивности; интерференция; многолучевое интерференционное световое поле.

Intensity gradients of multibeam interference light fields

A. A. Ryzhevich^{1, 2)}, I. V. Balykin¹⁾, T. A. Zheleznyakova²⁾

¹⁾ *B. I. Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus, Minsk, e-mail: a.ryzhevich@dragon.bas-net.by*

²⁾ *Belarusian State University, Minsk, Belarus,*

We consider light fields formed as a result of the interference of n in-phase coherent plane waves with intensities I_0/N propagating at equal angles to one axis, the directions of propagation of which form a picture with N -th order axial symmetry with regard to this axis. The intensity gradients of light fields are calculated for the quantity N of interfering waves from 2 to 24. The maximum values of the intensity gradient are determined for each value of N . It was found that the dependence of the maximum gradient value on N is close to directly proportional. For influencing a certain area periodic interference light fields are optimal, which are formed at $N = 2; 3; 4; 6$. At $N = 5; 7$, quasi-periodic light fields are formed, the distribution of intensity peaks in which is less uniform. Starting from $N = 8$, the slopes of the axial intensity peak provide an intensity gradient value that greatly exceeds the gradients for other intensity peaks. Such fields are optimal for point effects on single microobjects.

Keywords: intensity gradient; interference; multibeam interference light field.

Введение

Начиная с 1970 г. [1] лазерные световые пучки используются для воздействия градиентными силами светового поля на частицы различных размеров: от десятков микрометров до долей нанометра. В первых работах большой градиент световой

интенсивности обеспечивался узкой фокусировкой гауссова лазерного пучка [2]. Для захвата и охлаждения атомов применялись также лаггер-гауссовы пучки, имеющие минимум интенсивности на оси [3]. В [3–5] в качестве градиентного светового поля применялся бесселев световой пучок. В [6] были впервые выделены как отдельный класс многолучевые световые поля интерференционного типа. Данные пучки формируются при интерференции N когерентных световых пучков с интенсивностью I_0/N , распространяющихся под одним углом γ к общей оси так, что направления их распространения образуют осесимметричную картину N -го порядка. В [6] было впервые показано, что периодичными в поперечной плоскости являются поля, сформированные при интерференции 2, 3, 4, и 6 когерентных световых пучков. Как периодичные, так и непериодичные интерференционные поля в поперечном сечении содержат большое количество локальных максимумов интенсивности малых размеров, в связи с чем представляется актуальным получить распределения градиентов интенсивности подобных полей и изучить их особенности.

1. Градиенты интенсивности многолучевых интерференционных полей

В таблице 1 показаны периодические многолучевые интерференционные поля и их градиенты интенсивности.

Таблица 1

Распределения интенсивности и градиента интенсивности периодичных полей

N	Интенсивность	Модуль градиента	Радиальная часть	Азимутальная часть
2				
3				
4				
6				

Распределения модуля градиента периодических световых полей также являются периодическими (столбец 2 табл. 1). Осесимметричность порядка N находит проявление в распределениях радиальной и азимутальной компонент градиента (столбцы 3, 4 табл. 1). В таблице 2 представлены распределения интенсивности и градиента интенсивности некоторых непериодических полей. Световые поля при $N = 5; 7$ непериодичны, но при рассмотрении их распределения интенсивности не вблизи оси создается иллюзия периодичности. Такие поля принято называть квазипериодическими. В квазипериодических полях распределение интенсивности менее равномерно, чем в периодических, из-за наличия преобладающего по яркости осевого максимума интенсивности.

Таблица 2

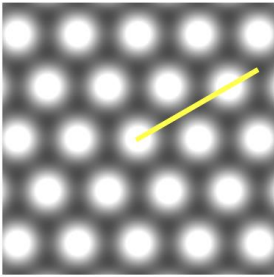
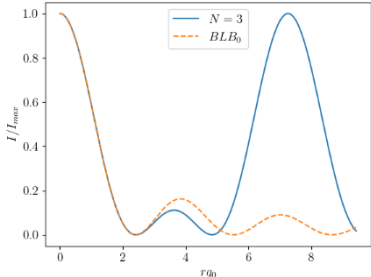
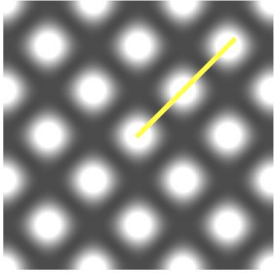
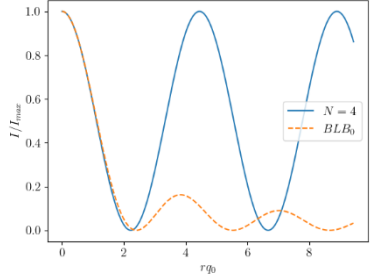
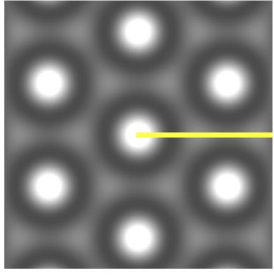
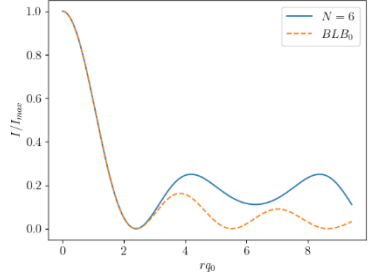
Распределения интенсивности и градиента интенсивности непериодических полей

N	Интенсивность	Модуль градиента	Радиальная часть	Азимутальная часть
5				
7				
10				
20				

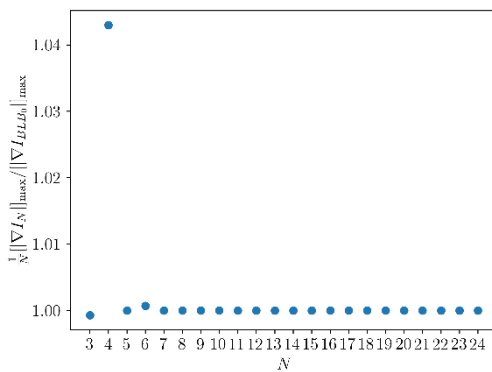
Примечательно, что при увеличении N в поперечном сечении поля растет количество кольцевых максимумов вокруг оси, но если вначале количество колец увеличивается на 1 при увеличении N на 2, то затем прирост количества колец существенно замедляется.

Произведен поиск точек с максимальным градиентом интенсивности в полях для различных N . В таблице 3 для полей при $N = 3; 4; 6$ показаны направления, вдоль которых наблюдаются наибольшие градиенты интенсивности.

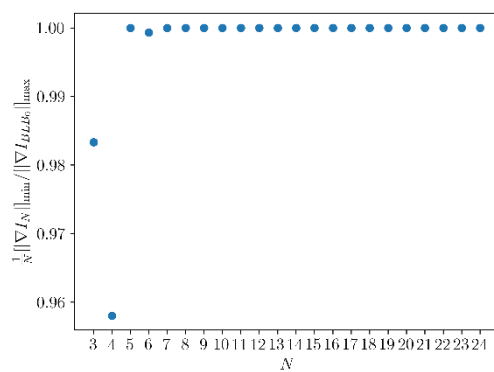
Поперечные и радиальные распределения интенсивности по направлениям с максимальным градиентом интенсивности

N	Поперечное распределение интенсивности и направление измерения радиального распределения	Радиальное распределение интенсивности вдоль направления с наибольшим градиентом интенсивности
3		
4		
6		

На рисунке показана зависимость максимального значения градиента от количества интерферирующих пучков N , нормированная на произведение N и максимального значения градиента интенсивности бesselова светового пучка с осевой интенсивностью I_0 и углом конусности γ .



а



б

Зависимость максимального (а) и минимального из максимальных вдоль различных лучей (б) значения модуля градиента от N

Из рисунка следует, что максимальное значение модуля градиента в целом растет прямо пропорционально N , однако при $N = 4$ наблюдается как наибольшее, так и наименьшее удельное значение модуля градиента в разных направлениях.

2. Обсуждение результатов и выводы

Зависимость максимального значения градиента интенсивности вдоль луча от азимутальной координаты имеет периодический характер. С увеличением числа интерферирующих волн зависимость максимального значения градиента интенсивности вдоль радиального луча от азимутальной координаты становится все более и более равномерной. Амплитуда осцилляций при числе интерферирующих волн $N > 10$ выходит на уровень, сопоставимый с погрешностью вычислений (10^{-8} от среднего и ниже). В связи с этим анализ осцилляций достаточно провести для $N \leq 10$. Число периодов осцилляций максимального значения градиента интенсивности вдоль луча от азимутальной координаты равно N для четного и $2N$ для нечетного N . Радиальная координата положения точки максимального значения градиента интенсивности вдоль луча от азимутальной координаты при интерференции N плоских волн с ростом N приближается к соответствующей радиальной координате для бесселева пучка (1,08197845). Для некоторых N ($N = 4; 8$) направления с наибольшим градиентом задаются как $\varphi_i = \frac{\pi}{N} + \frac{2\pi}{N}i$. Для $N = 3; 5; 7; 9$ $\varphi_i = \frac{\pi}{2N} + \frac{\pi}{N}i$. Для $N = 6; 10$ $\varphi_i = \frac{2\pi}{N}i$. Для нечетных N , начиная с 5, на луче с максимальным значением градиента интенсивности распределение интенсивности в области колец соответствует квадрату функции Бесселя. Поля при $N = 2; 3; 4; 6$ в силу периодичности оптимальны для воздействия на площади с множественными объектами. Остальные поля целесообразно применять для воздействия на точечные объекты благодаря наличию осевого максимума интенсивности, преобладающего над остальными локальными максимумами.

Библиографические ссылки

1. *Ashkin A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure // Physical Review Letters. 1970. Vol. 24, № 4, P. 156–159.*
2. *Ashkin A. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams / A. Ashkin, J. M. Dziedzic, T. Yamane // Nature. 1987. № 330, P. 769771.*
3. *Arlt J. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams / J. Arlt, T. Hitomi, K. Dholakia // Applied Physics B: Lasers and Optics. 2000. Vol. 71, № 4, P. 549–554.*
4. *Optical micromanipulation using a Bessel light beam / J. Arlt [et al.] // Optics Comm. 2001. Vol. 197. P. 239–245.*
5. *Florjańczyk M., Tremblay R. Guiding of atoms in a travelling-wave laser trap formed by the axicon // Optics Communications. 1989, Vol. 73, iss. 6, P. 448–450.*
6. *Methods of formation of gradient light fields / N. S. Kazak [и др.] // Seventh International conference on Laser and Laser-Information technologies: Proceedings of SPIE, Suzdal, Russia, 22–26 June 2001. / Ed. by V. Ya. Panchenko, V. S. Golubev. – Suzdal, Russia, 2001. Vol. 4644. P. 520–529.*