*09.2*

# Пространственные оптические ловушки на основе многопучковой интерференции

 *Н.В. Шостка (Ляхович), Б.В. Соколенко, О.С. Каракчиева (Сидоренкова), В.И. Шостка*

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия
E-mail: nataliya_shostka@mail.ru

*Поступило в Редакцию 9 апреля 2020 г.*
*В окончательной редакции 9 апреля 2020 г.*
*Принято к публикации 29 июля 2020 г.*

Представлена модель формирования пространственных оптических ловушек для захвата, перемещения и угловой ориентации микрочастиц на основе суперпозиции нескольких гауссовых пучков в различной геометрической конфигурации с управляемыми параметрами.

**Ключевые слова:** оптическая ловушка, интерференция, гауссов пучок.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.22.50299.18332

Контролируемый захват микрообъектов в различных средах, а также манипулирование их пространственным положением вдоль заданных траекторий с помощью света является одним из актуальных приложений лазеров с момента их появления. Актуальной задачей современных исследований является дальнейшее усовершенствование метода оптического пинцета и различных его конфигураций как прекрасного прикладного высокоточного инструмента в биологии и медицине для осуществления неинвазивного пространственного позиционирования биологических объектов в естественной среде. Для большинства современных прикладных задач реализации оптического захвата используются трехмерные оптические ловушки, представляющие собой равномерно окруженную максимумами интенсивности область с минимальной интенсивностью света [1,2]. Такие оптические структуры могут быть получены как в когерентном, так и в частично когерентном свете, например, при помощи аксикона [3,4].

Одним из знаковых моментов, повлиявших на развитие современной оптики, в том числе и направления реализации оптических ловушек, является создание пространственных световых модуляторов (SLM), позволяющих достаточно просто и точно формировать различные оптические пучки, а также их массивы, свойства которых можно изменять независимо и в режиме реального времени [5,6]. В [7,8] проанализирован процесс параметризации ловушки с помощью реконфигурируемых массивов пучков высшего порядка, включающих как скалярные сингулярные пучки, так и векторные с радиальным и азимутальным распределениями поляризации в одной и той же конфигурации системы ловушек.

Цель данного исследования состоит в разработке метода синтеза пространственных оптических ловушек за счет интерференционных эффектов определенного числа (от трех до пяти) лазерных пучков, управляющими параметрами суперпозиции которых являются углы наклона и прецессии относительно оси распространения, а также линейный сдвиг в поперечной плоскости от данной оси.

Отметим, что формирование тонкой интерференционной двумерной структуры на основе трех гауссовых пучков встречается в исследованиях [9,10], направленных на решение прикладных задач микро- и нанолитографии, в фотонных кристаллических устройствах [11] и микроскопии [12]. В качестве пространственной трехмерной структуры для захвата и удержания микрообъектов данные решения рассматривались частично в [2], а анализ пространственной эволюции поля в продольной и поперечной плоскости ранее не проводился.

Рассмотрим распространение монохроматического наклонного гауссова пучка с длиной волны $\lambda$ под некоторым малым углом $\alpha_0$ к оси $z$ (рис. 1, $a$), при этом мы ограничимся параксиальным приближением, что накладывает условие вида $\sin\alpha_0 \ll 1$, так что $\cos\alpha_0 \approx 1 - \alpha_0^2/2$. Напряженность электрического поля пучка будем описывать выражением

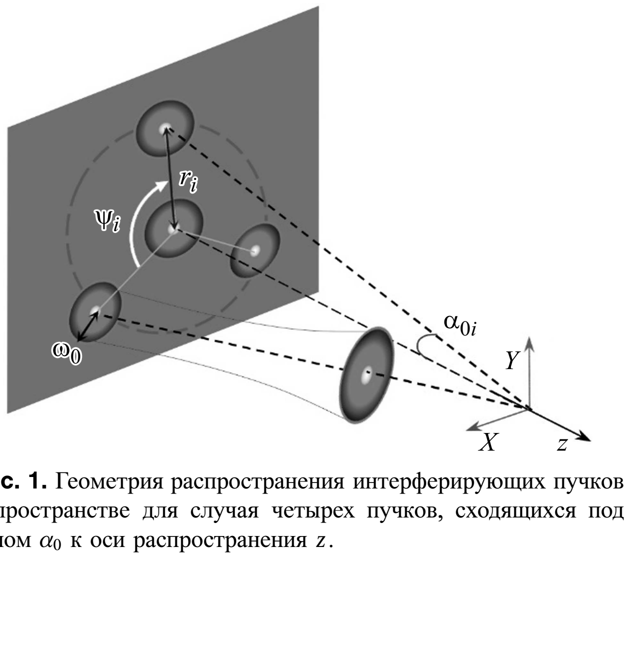


**Рис. 1.** Геометрия распространения интерферирующих пучков в пространстве для случая четырех пучков, сходящихся под углом $\alpha_0$ к оси распространения $z$.

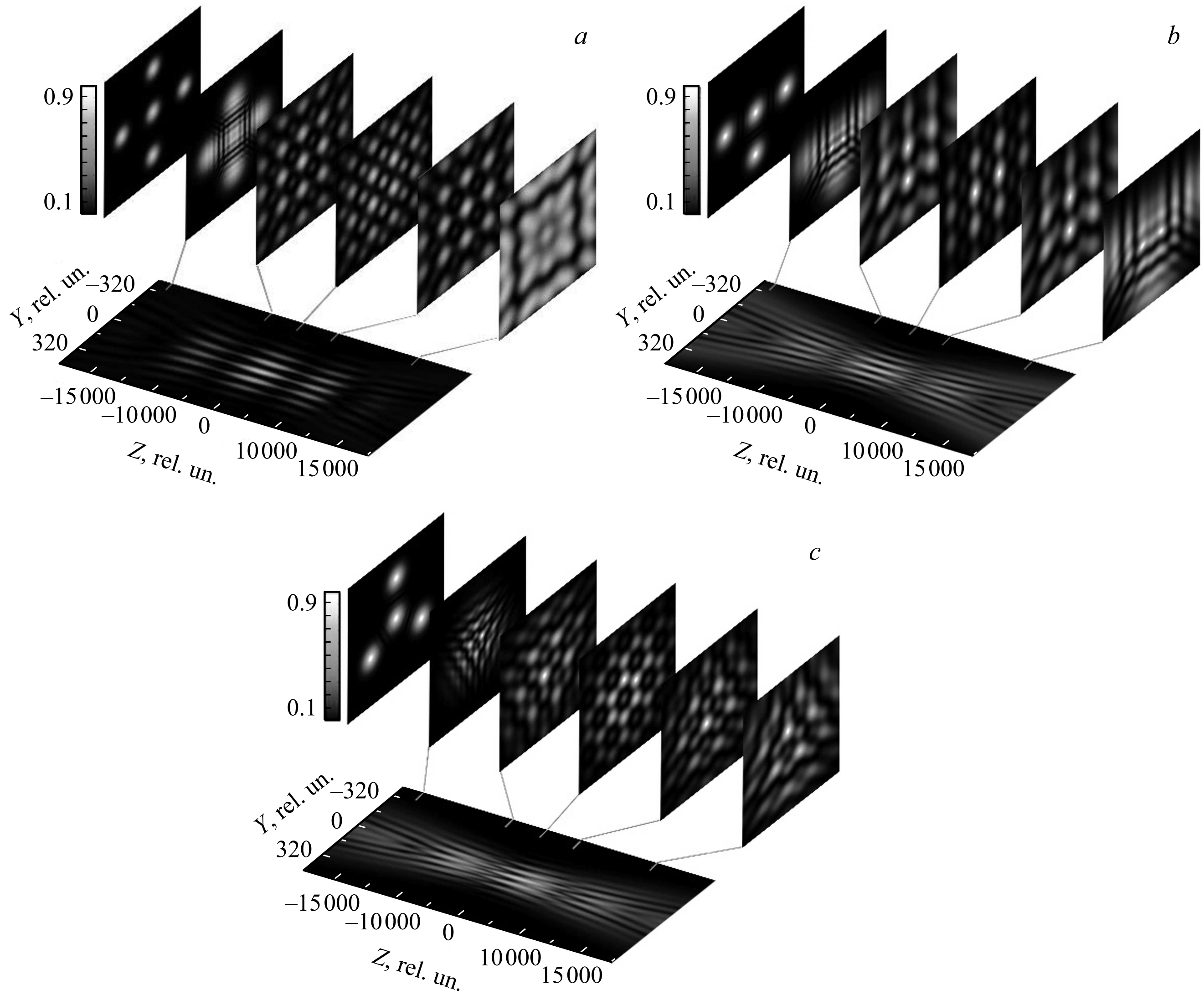


**Рис. 2.** Рассчитанные интерференционные картины суперпозиции пяти ($a$) и четырех ($b, c$) пучков с различной конфигурацией взаимного расположения, формирующие пространственные ловушки „закрытого“ типа за счет центрального осевого пучка.

$E = \tilde{E}(x, y, z)\exp(-ikz + i\varphi)$, где $\varphi$ — начальная фаза, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, $\tilde{E}$ — комплексная амплитуда, удовлетворяющая уравнению Гельмгольца

$$\partial_x^2\tilde{E} + \partial_y^2\tilde{E} - 2ik\partial_z\tilde{E} = 0. \qquad (1)$$

Простейшим решением данного уравнения является параксиальный гауссов пучок, в рассматриваемом случае распространяющийся наклонно по отношению к оси $z$ и характеризующийся преобразованием координат в плоскости $x0z$ вида $x \to X = x + i\alpha_{0i}z_0$, а в плоскости $y0z$ — вида $y \to Y = y + i\alpha_{0i}z_0$, где $z_0 = k_0\omega_0^2/2$, $\omega_0$ — радиус перетяжки пучка в плоскости $z = 0$ [13]. С учетом всех параметров (угла прецессии $\psi_i$ — поворота вокруг оси $z$ — и смещения центра пучка в поперечной плоскости $z = 0$ от оси на величину $r_i$) окончательный вид преобразования координат запишется в виде

$$X = (i\alpha_{0i}z_0 + x)\cos\psi_i + (y + r_i)\sin\psi_i,$$
$$Y = (i\alpha_{0i}z_0 - x + r_i)\sin\psi_i + y\cos\psi_i.$$

Решением уравнения (1) является комплексная амплитуда с гауссовой образующей

$$\tilde{E}_i(X, Y, z) = \frac{1}{1 - iz/z_0}\exp\left[-\frac{X^2 + Y^2}{\omega_0^2(1 - iz/z_0)}\right] \times \exp(-\alpha_{0i}^2 kz_0). \qquad (2)$$

По определению распределение интенсивности поля интерферирующих волн описывается выражением [10]:

$$I(X, Y, z) = \sum_{i=1}^{N}|E_i|^2 + \sum_{i\neq j}^{N}E_iE_j,$$

представляющим собой сумму квадратов амплитуд и интерференционные члены пар пучков с соответствующими индексами $i$, $j$, которые изменяются в нашем случае в диапазоне от 1 до $N$, где $N$ — число интерферирующих пучков, амплитуда которых определяется

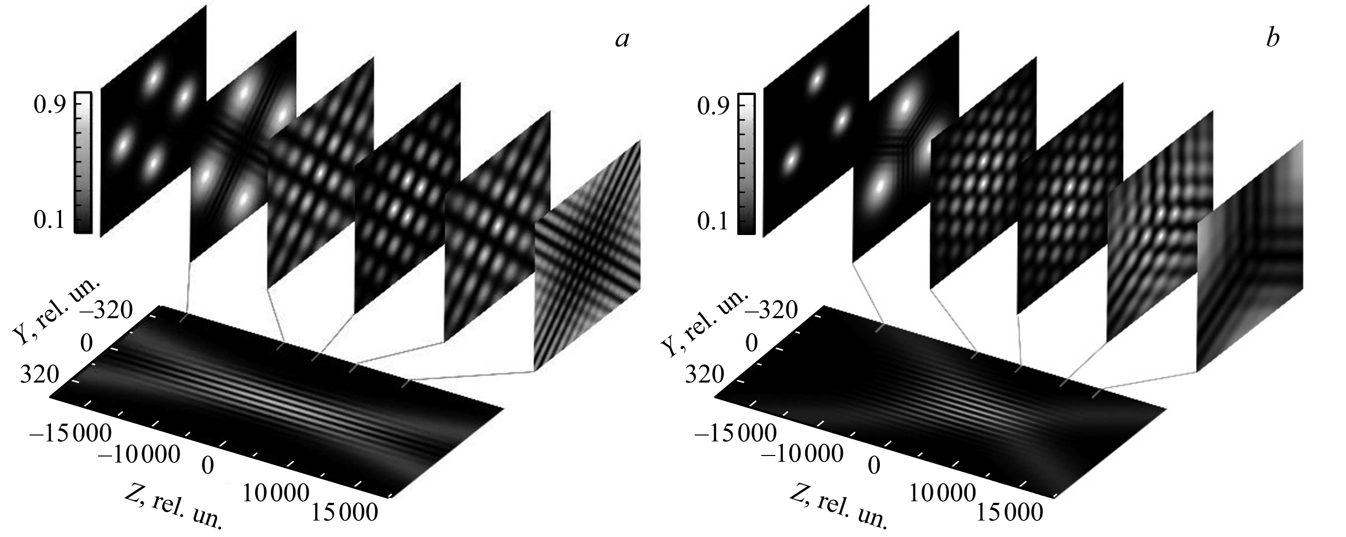


**Рис. 3.** Рассчитанные интерференционные картины суперпозиции четырех ($a$) и трех ($b$) пучков, формирующие пространственные ловушки „открытого“ типа.

выражением (2) и в простейшем случае может быть одинаковой для всех пучков. Таким образом, геометрическая пространственная структура интерференционного поля будет описываться соответствующим набором параметров $\psi_i$, $r_i$ и $\alpha_{0i}$ отдельного пучка. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования распространения $N$ пучков различной конфигурации с осевым центральным пучком и соответствующая им динамика интерференционной картины. Масштаб приведен в относительных единицах $z/\lambda$, $Y/\lambda$.

Характер формирования интерференционных минимумов и максимумов в виде структуры ячеек на рис. 2, $a$ обусловлен одинаковым углом наклона пучков по отношению к центральному пучку на угол $\alpha_{0i} = 0.03\,\mathrm{rad}$ и равным расстоянием от его оси. Такое расположение пучков дает равномерную локализацию максимумов и минимумов интенсивностей как в поперечной, так и в продольной плоскости, расстояние между ближайшими максимумами равно $d = \lambda/(\sqrt{2}\sin\alpha_{0i})$ [11]. Для случая, изображенного на рис. 2, $b$, несимметричное расположение пучков обусловливает снижение контраста и деформацию структуры максимумов.

Картина заметно изменяется при симметричном расположении трех периферических пучков относительно центрального на одинаковом расстоянии $r_i$, как показано на рис. 2, $c$. В данном случае центральный пучок позволяет сформировать ловушки в „закрытом“ состоянии: каждый минимум интенсивности окружен соседними максимумами, расположенными в продольной и поперечной плоскостях. Такие локальные структуры известны также как „бутылочные“ пучки [14]. При этом в поперечной плоскости формируется гексагональная структура с ярко выраженным центральным минимумом. Полученная симметрия поля пучка может быть использована для захвата поглощающих свет частиц, размеры которых превышают $d$, в центральную область с минимумом интенсивности, а более мелких объектов с высоким показателем преломления — в ячейки с максимумом интенсивности.

Отдельно следует отметить генерацию „открытых“ ловушек при отсутствии осевого пучка (рис. 3, $a, b$). Тонкая периодическая структура в продольном направлении разрушается, тем не менее в поперечном сечении пучков наблюдаются ячейки с ярко выраженными максимумами интенсивности округлой формы, в свою очередь являющиеся „открытыми“ в продольном направлении. Такая геометрия суперпозиции пучков может быть использована для двумерного захвата и поворота массива объектов с показателем преломления больше показателя окружающей среды.

Полученные результаты демонстрируют возможность применения суперпозиции трех и более пучков для генерации пространственных оптических ловушек — „бутылочных“ пучков. Управление расположением ловушек в виде квазипериодической структуры минимумов и максимумов интенсивности обеспечивается изменением параметров конфигурации интерферирующих пучков: угла наклона пучков относительно оси распространения, их взаимного расположения и количества. Такой подход позволяет создать простой механизм реализации оптических манипуляторов на практике с применением пространственных световых модуляторов, амплитудных экранов и интерферометров на основе деления волнового фронта.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Совета министров Республики Крым (грант № 19-42-910010 р_а), а также стипендии Президента РФ молодым ученым № СП-745.2019.4.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] *Arlt J., Padgett M.J.* // Opt. Lett. 2000. V. 25. N 4. P. 191–193. DOI: 10.1364/OL.25.000191
[2] *Shvedov V.G., Hnatovsky K., Shostka N.V., Rode A., Krolikowsky W.* // Opt. Lett. 2012. V. 37. N 11. P. 1934–1936. DOI: 10.1364/OL.37.001934
[3] *Yang Z., Lin X., Zhang H., Xu Y., Jin L., Zou Y., Ma X.* // Opt. Lasers Eng. 2020. V. 126. P. 105899. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.105899
[4] *Yang Z., Lin X., Zhang H., Ma X., Zou Y., Xu L., Xu Y., Jin L.* // Appl. Opt. 2019. V. 58. N 10. P. 2471–2480. DOI: 10.1364/AO.58.002471
[5] *Porfirev A.P., Dubman A.B., Porfiriev D.P.* // Opt. Lett. 2020. V. 45. N 6. P. 1475–1478. DOI: 10.1364/OL.386907
[6] *Ghebjagh S.G., Fischer D., Sinzinger S.* // Appl. Opt. 2019. V. 58. N 32. P. 8943–8949. DOI: 10.1364/AO.58.008943
[7] *Bhebhe N., Williams P., Rosales-Guzmán C., Rodriguez-Fajardo V., Forbes A.* // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 17387. DOI: 10.1038/s41598–018–35889–0
[8] *Gong Z., Pan Y., Videen G., Wang C.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2018. V. 214. P. 94–119. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.027
[9] *Beckemper S., Huang J., Gillner A.D., Wang K.* // JLMN. 2011. V. 6. N 1. P. 49–53. DOI: 10.2961/jlmn.2011.01.0011
[10] *Ionel L., Zamfirescu M.* // Romanian Rep. Phys. 2017. V. 69. N 1. P. 402.
[11] *Burrow G.M., Gaylord T.K.* // Micromachines. 2011. V. 2. N 2. P. 221–257. DOI: 10.3390/mi2020221
[12] *Senthilkumaran P., Masajada J., Sato S.* // Int. J. Opt. 2012. V. 18. P. 517591. DOI: 10.1155/2012/517591
[13] *Fadeyeva T.A., Rubass A.F., Sokolenko B.V., Volyar A.V.* // J. Opt. A. 2009. V. 11. N 9. P. 094008. DOI: 10.1088/1464-4258/11/9/094008
[14] *Shostka N.V., Karakchieva O.S., Sokolenko B.V., Shostka V.I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1400. P. 066028. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/6/066028