

Моделирование и анализ структуры модифицированного аксикона в качестве оптической ловушки

В.Н.Кречко
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
krechkovsevolod@mail.ru

Аннотация — Оптические бутылки, или световые оптические ловушки, являются особым типом лазерных ловушек, которые используются для удержания микроскопических объектов, таких как микрочастицы. Этот метод основан на использовании фокусировки лазерного луча, который создает градиент силы, притягивающей (или отталкивающей) микрочастицу к зоне наибольшей интенсивности света. Часто, подобные ловушки требуют нахождения оптимальных параметров, для их стабилизации. В данной работе было проведено исследование модификаций дифракционного аксикона для оптимизации структуры оптической ловушки.

Ключевые слова — оптическая бутылка, дифракционный аксикон, оптимизация структуры, преобразование Френеля, преобразование Фурье, ускорение расчётов с помощью GPU.

I. ВВЕДЕНИЕ

Оптическая ловушка [1-3], в том числе, оптическая бутылка [4, 5], представляет собой специальное распределение 3D интенсивности лазерного излучения для захвата и удержания микроскопических объектов.

Основным компонентом оптической ловушки является сфокусированный лазерный пучок, который создает силу, притягивающую или отталкивающую объект. Эта сила называется оптической силой или силой захвата.

Чтобы создать темную область, окруженную световым барьером или оптическую "бутылку", необходимо взаимодействие/интерференция лучей от различных частей оптического элемента. Когда непрозрачный или отражающий объект попадает внутрь темной зоны, он отталкивается от световых барьеров. Это позволяет ловушке удерживать объект в неподвижном состоянии или перемещать его в нужное место.

Хорошо известно формирование оптических бутылок на основе дополнения линзы бинарным аксиконом [6, 7]. В этом случае темная область интенсивности формируется в фокальной плоскости линзы. При этом сформированная оптическая бутылка, как правило, имеет большой поперечный размер, что препятствует устойчивому захвату отдельной частицы.

В данной работе проведено исследование модификаций дифракционного аксикона для формирования и оптимизации структуры оптической ловушки в парааксиальной области на некотором расстоянии от оптического элемента.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В данной работе рассматривается пучок создаваемый дифракционным эллиптическим аксиконом [8]:

$$f(x, y) = e^{(-ik\sqrt{(\alpha x)^2 + (\beta y)^2})}, \quad (1)$$

где k – волновое число, α и β – параметры, влияющие на эллиптичность аксикона.

Сначала было исследовано действие обычного дифракционного аксикона с $\alpha = \beta$, представляющего собой набор концентрических колец (рис. 1), при наложении на него различных ограничивающих апертур (рис. 2) с целью изменения продольной структуры пучка [9, 10]. Отметим, что аналогичным способом возможно формирование оптических бутылок с использованием автофокусирующихся пучков [11, 12].

Моделирование сформированного поля выполнялось на основе преобразования Френеля, численная реализация которого была сведена к использованию быстрого преобразования Фурье (БПФ). Программа была реализована с помощью математического языка программирования Python, для ускорения вычислений программный код был оптимизирован для выполнения на GPU, с помощью библиотеки Cyru и CUDA Toolkit Данное программное решение может быть полезно при исследовании продольной структуры парааксиальных пучков и оптимизации характеристик формируемых оптических бутылок. Значения на всех графиках нормированные.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

За основу был взят пучок генерируемый аксиконом с параметрами α и $\beta = 0,0023 \text{ мм}^{-1}$. На рис. 1 представлен вид аксикона во входной области. Далее моделируется пучок генерируемый аксиконом, при наложении ограничивающих апертур (рис. 2).

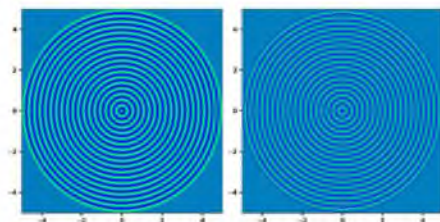


Рис. 1. Изображение амплитуды (левое изображение) и фазы (правое изображение) дифракционного аксикона.

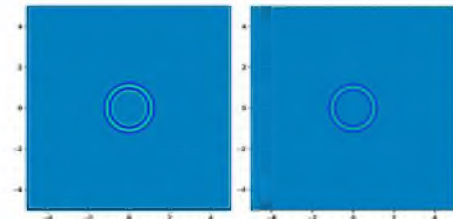


Рис. 2. Изображение амплитуды и фазы пучка генерируемого аксиконом с ограничивающими апертурами.

Для оптимизации зависимости параметров продольной структуры от параметров наложенной апертуры, было построено множество вариантов и сформулированы критерии оценки качества оптической ловушки. (оптимальные значения минимумов показаны на рис. 3). Кроме того, была исследована возможность формирования оптических бутылок с использованием эллиптического аксикона (рис. 4 и 5). Хорошо заметны две области возможного захвата.

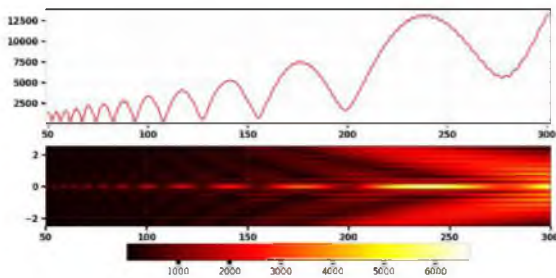


Рис. 3. Продольное распределение интенсивности вдоль центральной оси и график для аксикона с наложенной уменьшенной кольцевой апертурой.

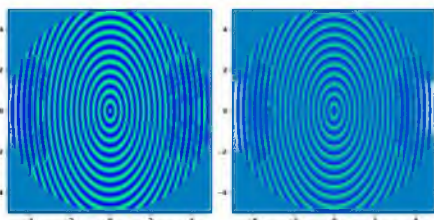


Рис. 4. Амплитуда и фаза эллиптического аксикона.

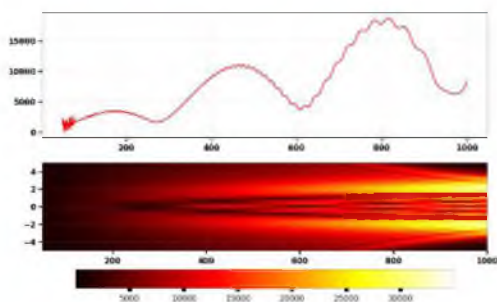


Рис. 5. Продольное распределение интенсивности вдоль центральной оси и график для пучка, сформированного эллиптическим аксиконом.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы различные вариации амплитудных аподизаций и эллиптических преобразований структуры дифракционного аксикона с целью формирования и оптимизации структуры оптической ловушки в паракиальной области на некотором расстоянии от оптического элемента.

Для построения продольного распределения было использовано быстрое преобразование Фурье. Программа была оптимизирована под использование на GPU, для ускорения вычислений.

На основании результатов, полученных в данной работе, показано, что сформированные пучки могут быть использованы для создания множественных обычных оптических ловушек с максимумами интенсивности на оптической оси, так и ловушек типа “оптическая бутылка”.

Высокая точность и контроль оптических ловушек делает их полезными инструментами для множества научных исследований и технологических приложений, таких как захват и исследование атомов и молекул, а также манипуляции с наночастицами [13].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gong, Z. Optical trapping and manipulation of single particles in air: Principles, technical details, and applications / Z. Gong, Y.-L. Pan, G. Videen, C. Wang // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2018. – Vol. 214. – P. 94–119. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.027.
- [2] Nalimov, A.G. Optical force acting on a particle in the presence of a backward energy flow near the focus of a gradient lens / A.G. Nalimov // *Computer Optics.* – 2020. – Vol. 44(6). – P. 871–875. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-744.
- [3] Porfirev, A.P. Multi-plane photophoretic trapping of airborne particles with a multi-linear optical trap / A.P. Porfirev, S.A. Fomchenkov, D.P. Porfirev, S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *Optik.* – 2022. – Vol. 7. – P. 271. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.170118.
- [4] Arlt, J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: The optical bottle beam / J. Arlt // *Opt. Lett.* – 2000. – Vol. 25. – P. 191–193. DOI: 10.1364/OL.25.000191.
- [5] Pavelyev, V. Diffractive optical elements for the formation of “light bottle” intensity distributions / V. Pavelyev, V. Osipov, D. Kachalov, S.N. Khonina, W. Cheng, A. Gaidukeviciute, B. Chichkov // *Applied Optics.* – 2012. – Vol. 51(18). – P. 4215–4218. DOI: 10.1364/AO.51.004215.
- [6] Zeng, X. The analytical description and experiments of the optical bottle generated by an axicon and a lens / X. Zeng, F. Wu // *J. Mod. Opt.* – 2008. – Vol. 55. – P. 3071–3081. DOI: 10.1364/JOSAA.27.002394.
- [7] Khonina, S.N. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Appl. Phys. B.* – 2018. – Vol. 124. – P. 191. DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
- [8] Khonina, S.N. Modern Types of Axicons: New Functions and Applications / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, P.A. Khorin, M.A. Butt // *Sensors.* – 2021. – Vol. 21. – P. 6690. DOI: 10.3390/s21196690.
- [9] Khonina, S.N. Optical Bottle Shaping Using Axicons with Amplitude or Phase Apodization / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.I. Kharitonov, S.A. Fomchenkov, A.P. Porfirev // *Photonics.* – 2023. – Vol. 10(2). – P. 200. DOI: 10.3390/photonics10020200.
- [10] Qian, Y. Generation of high-power bottle beams and autofocusing beams / Y. Qian, S. Lai, H. Mao // *IEEE Photon. J.* – 2018. – Vol. 10. – P. 6500607. DOI: 10.3390/photonics10020200.
- [11] Khonina, S.N. Mirror and circular symmetry of autofocusing beams / S.N. Khonina // *Symmetry.* – 2021. – Vol. 13(10). – P. 1794. DOI: 10.3390/sym13101794