

В. И. Наливайко^{1✉}, М. А. Пономарева¹, Ю. Ц. Батомункуев²

Формирование кольцевого изображения с помощью пленочного аксикона с предельно большим фокусным расстоянием

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий,

г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Аннотация. Предложена и экспериментально апробирована методика получения кольцевых изображений с помощью пленочных аксиконов в тандеме с линзами. Измерены диаметры колец в оптической схеме линзакон с линзами, имеющими различные фокусные расстояния. Параксиальные лазерные пучки на выходе пленочного аксикона фокусируются линзами вблизи их фокусных плоскостей, при этом диаметры колец увеличиваются с ростом фокусных расстояний линз.

Ключевые слова: пленочный аксикон, халькогенидные слои, линзакон

V. I. Nalivaiko^{1✉}, M. A. Ponomareva¹, Yu. Ts. Batomunkuev²

Formation of ring image using film axicon with extremely long focal length

¹ Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Abstract. A method for obtaining ring images using film axicons in tandem with lenses is proposed and experimentally tested. The diameters of the rings in the optical scheme of a lensacon with lenses having different focal lengths are measured. Paraxial laser beams at the output of a film axicon are focused by lenses near their focal planes, and the diameters of the rings increase with the growth of the focal lengths of the lenses.

Keywords: film axicon, chalcogenide layers, lensacon

Введение

В пространстве за аксиконом условно можно выделить две зоны, каждая из которых имеет свое применение (рис. 1). Ближняя зона начинается сразу за аксиконом. В этой области аксикон генерирует узкий протяженный фокусный отрезок. В дальней зоне за аксиконом формируются кольца [1–5].

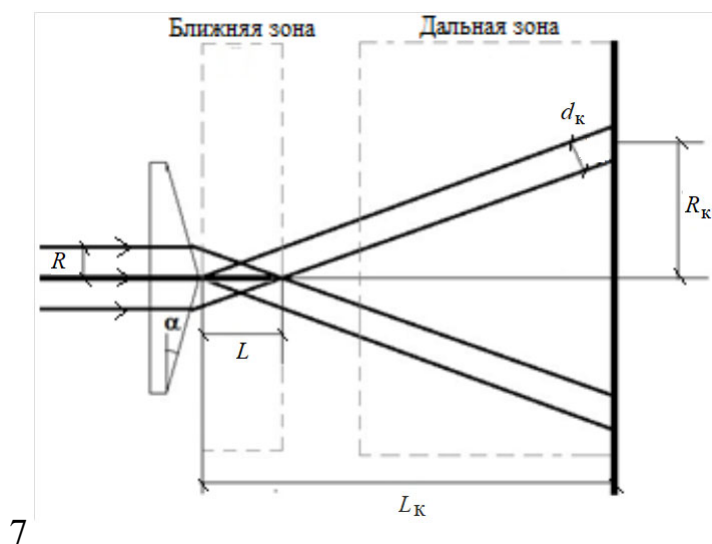


Рис. 1. Принципиальная схема преобразования плоского волнового фронта на входе аксикона в фокусный отрезок в ближней зоне и в кольцевое изображение в дальней зоне за аксиконом

Для формирования и применения круговых изображений на близком расстоянии от аксикона применяют аксиконы с большими углами α порядка 20° и короткими фокусными отрезками L . Для формирования предельно длинных фокусных отрезков L угол α аксикона уменьшают до величины, которую может обеспечить выбранная технология. Формулы для расчета длины фокусного отрезка L и радиуса колец R_k на расстоянии L_k от аксикона приведены в [6, 7].

При создании объемных и дифракционных аксиконов различного типа анализируют в основном поведение фокусных отрезков, а параметрам кольцевого изображения в дальней оптической зоне уделяется меньше внимания [3]. Все потребители аксиконов прекрасно знают, что определяющими атрибутами аксиконов являются наличие фокусного отрезка в ближней зоне, а в дальней зоне – кольцевого изображения. При применении пленочных аксиконов с предельно большими по величине фокусными отрезками [4, 5] из-за секундных углов между интерферирующими оптическими лучами, формирующими фокусный отрезок в ближней зоне и кольцевое изображение – в дальней зоне, возникают трудности обнаружения кольцевых изображений из-за их малых размеров и большой удаленности от аксикона. В связи с этим у потребителей возникают сомнения в корректности формирования бесселевых пучков с помощью пленочных аксиконов. В этом случае от изготовителей аксиконов требуется разработка методики экспериментального подтверждения формирования бесселевых пучков пленочным аксиконом. Целью настоящей работы является апробация такой методики и демонстрация полученных с ее помощью результатов.

Методы и материалы

Максимальная толщина слоев As_2S_3 в центре аксиконов варьировалась от 0,4 до 10 мкм. Подложки для напыления изготавливались из оптического кварца или

оксидного стекла К-8. Для аксиконов с толщиной в центре конуса до 10 мкм использовались подложки из материалов CaF_2 или BaF_2 , имеющие близкие по величине коэффициенты линейного расширения с напыляемым материалом, что исключало растрескивание слоев в процессе хранения и эксплуатации аксиконов.

Предлагаемая нами оптическая схема для экспериментального подтверждения наличия кольцевого изображения, формируемого исследуемым аксиконом, представляет собой тандем аксикона и линзы, так называемый линзакон (рис. 2).

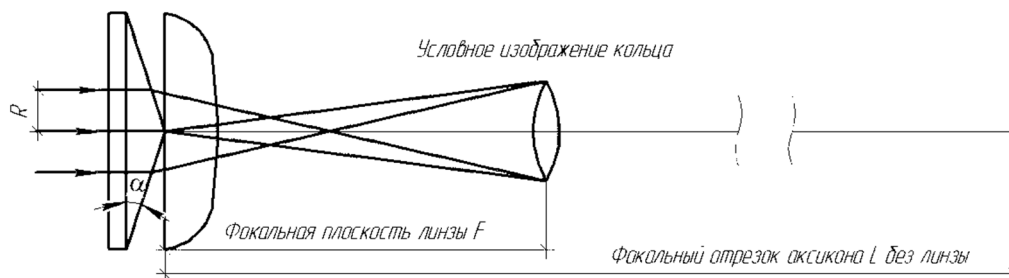


Рис. 2. Линзакон с пленочным аксиконом и сменной линзой

С помощью такого линзакон, в котором можно заменять линзы с различными фокусными расстояниями, получаем изменение диаметра сфокусированного кольцевого изображения в широких пределах. При этом кольцевое изображение приближается к аксикону и фокусируется вблизи фокусной плоскости линзы.

Результаты

Экспериментальные исследования проводились с пленочными аксиконами толщиной в центре конуса, равной 1 мкм. Для получения оптических систем типа линзакон применялись две сменные положительные линзы с фокусными расстояниями F , равными 1 м и 2 м. Полупроводниковый лазер с рабочей длиной волны $\lambda = 640$ нм, расширителем пучка и коллиматором использовались в качестве источника излучения с плоским волновым фронтом. Измеренные диаметры сфокусированных колец приведены в табл. 1.

Таблица 1

Радиусы колец двух линзакон

Название способа	Фокусное расстояние линзы F , м	Диаметр кольца, мм
Способ 1	1,0	3,5
Способ 2	2,0	7,1

Из приведенных в табл. 2 результатов видно, что кольцевое изображение наибольшего диаметра получается с помощью линзы, имеющей фокусное расстояние $F = 2,0$ м. Уменьшение диаметра кольца в два раза происходит при замене линзы на линзу с фокусным расстоянием $F = 1,0$ м. При этом сфокуси-

ванное изображение кольца формируется вблизи фокальной плоскости линзы, которая в два раза ближе к аксикону.

Видно, что при формировании кольцевых изображений в центре кольца отсутствует изображение осевого фокусного пучка света, что характерно для дальней зоны, где не происходит формирование фокусного отрезка (рис. 3). Таким образом, мы приближаем кольцевое изображение практически из бесконечности (более 90 метров), фокусируя его вблизи фокусной плоскости линзы на расстоянии 1 или 2 метра.

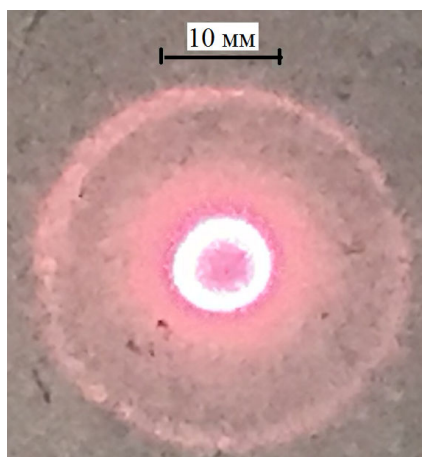


Рис. 3. Сфокусированное кольцевое изображение, полученное с помощью тандема пленочного аксикона и линзы с фокусным расстоянием $F = 2,0$ м вблизи ее фокальной плоскости

Обсуждение

Технология изготовления пленочных аксиконов имеет ряд преимуществ перед дифракционными, в частности в том, что отсутствует необходимость формирования скачков фазы оптических пучков на границах зон. Размытые границы зон являются источниками паразитного рассеяния и потерь эффективности преобразованных пучков света. У пленочных аксиконов отсутствуют эти источники потерь. Компьютерное управление процессом напыления, разработанное и апробированное в работе, выполненной в ИАЭ СО РАН, обеспечивает повторяемость режимов нанесения слоев термическим испарением и стабильность характеристик получаемых пленочных аксиконов. Однако, наша рабочая технология напыления пленочных аксиконов требует еще более высокой точности при совмещении центра маски с центром вращения подложки.

Заключение

Экспериментально подтверждено, что пленочный аксикон функционально работает нормально, формируя кольцевое изображение в дальней зоне за фокусным отрезком. Радиусы колец в сфокусированном виде можно изменять с помощью положительных оптических линз, отличающихся фокусными расстояниями.

У аксиконов с большими по величине фокусными отрезками (десятки метров) сфокусированные кольцевые изображения удобно формировать с помощью оптических линз с небольшими фокусными расстояниями F порядка одного или двух метров, таким путем приближая кольцевые изображения к аксикону.

Рассмотренная методика может быть предложена потребителям пленочных аксиконов для оценки их качества.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки № гос. рег. 121022000126-9.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Parigger C., Tang Y., Plemmons D. H., Lewis J. W. L. Spherical aberration effects in lens-axicon doublets: Theoretical study // Appl. Opt. 1997. 36, N 31. P. 8214-8221.
2. Koronkevich V. P., Mikhaltsova I. A., Churin E. G., Yurlov Yu. I. Lensacon // Appl. Opt. 1993. 34, N 25. P. 5761-5772
3. Казанский Н.Л., Хонина С. Н. Анализ эффектов непараксиальности в линзаконных оптических системах // Автометрия. 2017. Т. 53, № 5, С. 78–89.
4. Наливайко В.И., Пономарева М.А., Колдаев А.Е. Оптические аксиконы, полученные вакуумным напылением // Междун. научн. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018», 23-27 апреля 2018 г., Новосибирск: Национал. науч. конф. «СИБОПТИКА-2018»: сб. материалов в 2 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 2. – С. 16–23.
5. Наливайко В.И., Пономарева М.А. Формирование оптических аксиконов с максимальными фокусными отрезками // Автометрия, 2020, Т. 56, № 4, С. 89 – 94.
6. Пятницкий Л.Н. Волновые бесселевы пучки. – М. Физматлит, 2012. – 408 с.
7. Weber N., Spether D., Seifert A., Zappe H. Highly compact imaging using Bessel beams generated by ultraminiaturized multi-micro-axicon systems // J. Opt. Soc. Am. A. – 2012. – V.29 – P.808–816.

© В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, Ю. Ц. Батомункуев, 2025