

*Ю. Ц. Батомункуев<sup>1,2✉</sup>, В. И. Наливайко<sup>3</sup>*

## **Расчет aberrаций дифракционного аксикона**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: opttechnic@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрена aberrация уширения светящегося тонкого кольца, являющегося изображением точки схождения сферической волны, падающей на толстый дифракционный аксикон. Представлены расчетные зависимости этой aberrации уширения от периода и радиуса кривизны штрихов дифракционного аксикона. Показано, что выбором оптимального радиуса дифракционной структуры аксикона и расстояния от аксикона до плоскости наблюдения можно уменьшить ширину светящегося кольца до дифракционных размеров.

**Ключевые слова:** дифракционный аксикон, aberrации аксикона

*Y. T. Batomunkuev<sup>1,2✉</sup>, V. I. Nalivaiko<sup>3</sup>*

## **Calculation of aberrations of the diffraction axicon**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian State University of Telecommunications and Informatics,  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: opttechnic@mail.ru

**Abstract.** The paper considers the aberration of the broadening of a luminous thin ring, which is an image of the convergence point of a spherical wave incident on a thick diffraction axicon. The calculated dependences of this broadening aberration on the period and radius of curvature of the diffraction axicon lines are presented. It is shown that by choosing the optimal radius of the diffraction structure of the axicon and the distance from the axicon to the observation plane, it is possible to reduce the width of the luminous ring to diffraction sizes.

**Keywords:** diffraction axicon, aberrations of the axicon

В настоящее время оптический элемент аксикон [1, 2] применяется в разных оптических устройствах, например, в оптических устройствах контроля для увеличения глубины резкости изображения [3], в лазерных нивелирах для задания круговой линии в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Формирование ширины кольцевого распределения интенсивности световой волны, прошедшей через аксикон, задается поперечными размерами падающей плоской световой волны. Для этой цели были предложены дифракционные и голографические аналоги фокусирующих и рассеивающих рефракционных аксиконов в виде прозрачной пластины с сформированными на ее поверхности или в объеме радиальных

модуляций толщины, коэффициента поглощения или показателя преломления, в виде концентрических окружностей [4]. В ряде задач наблюдения требуется формирование узкого кольцевого распределения световой волны [5] и ввода в поле зрения наблюдателя [6]. Достичь этого можно использованием сходящейся на аксикон световой волны с одновременным уменьшением толщины кольцевого распределения интенсивности, формируемого дифракционным аксиконом. Но уменьшению толщины светящегося кольца препятствуют aberrации дифракционного аксикона. Известным недостатком тонкого дифракционного аксикона является наличие множества порядков дифракции, тогда как толстый дифракционный аксикон имеет один порядок дифракции. Поэтому целью настоящей работы является рассмотрение зависимостей aberrаций толстого дифракционного аксикона от периода и радиуса кривизны штрихов аксикона.

### ***Особенности формирования изображений толстым дифракционным аксиконом***

Толстый дифракционный аксикон представляет собой прозрачную пластину, в объеме которой сформирована дифракционная микроструктура в виде концентрических колец (обручей) с общим центром, как показано на рис. 1. При перпендикулярном падении на толстый дифракционный аксикон сходящейся или расходящейся монохроматической световой волны дифрагировавшие волны имеют один дифракционный порядок (рис. 2), в котором распространяется соответственно сходящаяся или расходящаяся световая волна с коническим волновым фронтом. При падении на толстый дифракционный аксикон осевой сходящейся (расходящейся) световой волны дифрагировавшая сходящаяся (расходящаяся) коническая волна формирует действительное (мнимое) изображение точечного источника  $S_0$  в виде светящейся окружности. Дифрагировавшая расходящаяся волна формирует вдоль оптической оси аксикона фокальный отрезок, в дифрагировавшей сходящейся волне фокальный отрезок отсутствует.

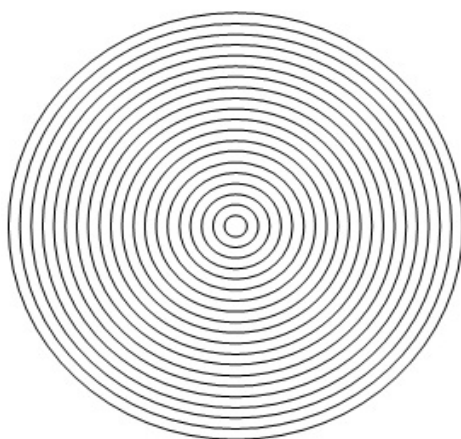


Рис. 1. Дифракционный аксикон

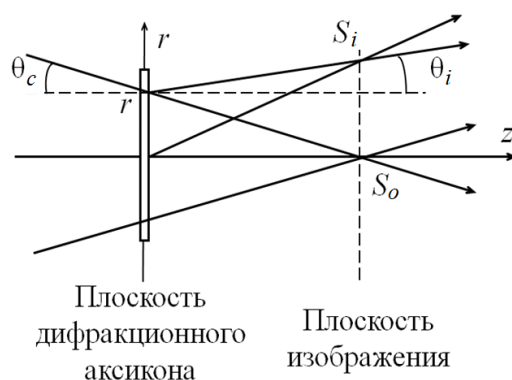


Рис. 2. Формирование изображения точечного источника  $S_o$

### ***Расчет aberrаций дифракционного аксикона***

Расчет монохроматических aberrаций рассмотрим на примере толстого дифракционного аксикона, на который падает сходящаяся световая волна. Предполагается, что аксикон находится в однородной среде с показателем преломления, равным среднему показателю преломления аксикона. Расчет aberrаций выполнен лучевым методом из условия локального максимума интенсивности дифрагировавших узких пучков света на дифракционном аксиконе. Дифракционный аксикон считается состоящим из маленьких локальных дифракционных решеток. Сходящаяся сферическая волна предполагается состоящей из узких сходящихся пучков световой волны. Для формирования изображения  $S_i$  точки схождения  $S_o$  волны на каждой локальной решетке дифракционного аксикона должно выполняться условие максимума интенсивности дифрагировавшего узкого пучка световой волны

$$d(\sin \theta_c + \sin \theta_i) = \lambda, \quad (1)$$

где  $d$  – период локальной дифракционной структуры аксикона;  $\theta_c$ ,  $\theta_i$  – локальные углы падения и дифракции узких световых пучков;  $\lambda$  – длина световой волны в среде.

Ширина  $\Delta r$  светящейся окружности в плоскости наблюдения равна

$$\Delta r = r + z_i (\operatorname{tg} \theta_i - \operatorname{tg} \theta_{oi}) \quad (2)$$

где  $z_i$  – расстояние от аксикона до плоскости наблюдения изображения  $S_i$ ;  $\theta_{oi}$  – локальный угол дифракции светового пучка, падающего вдоль оптической оси аксикона.

На рис. 3а), 3б) и 3в), 3г) представлены расчетные зависимости ширины  $\Delta r$  и радиуса  $r_i$  светящейся окружности от изменения радиуса  $r$  кривизны и периода  $d$  дифракционной структуры аксикона. Получено, что для длины волны  $\lambda = 532$  нм при расстояниях  $z_c = 0,7$  м и  $z_i = 0,695$  м значения aberrации уширения  $\Delta r$  светящегося кольца не превышают 18 мкм для диаметра дифракционного аксикона  $D = 24$  мм.

Дифракционное уширение  $\Delta r$  светящегося тонкого кольца, сформированного дифракционным аксиконом, может быть оценено из условия

$$\Delta r \approx \frac{\lambda z_i}{D},$$

где  $D$  – диаметр дифракционного аксикона. При длине волны  $\lambda = 532$  нм, расстоянии  $z_i = 0,7$  м и диаметре аксикона  $D = 24$  мм дифракционное уширение светящегося кольца равно  $\Delta r \approx 15$  мкм. Относительное отверстие такого дифракционного аксикона составляет 1:30.

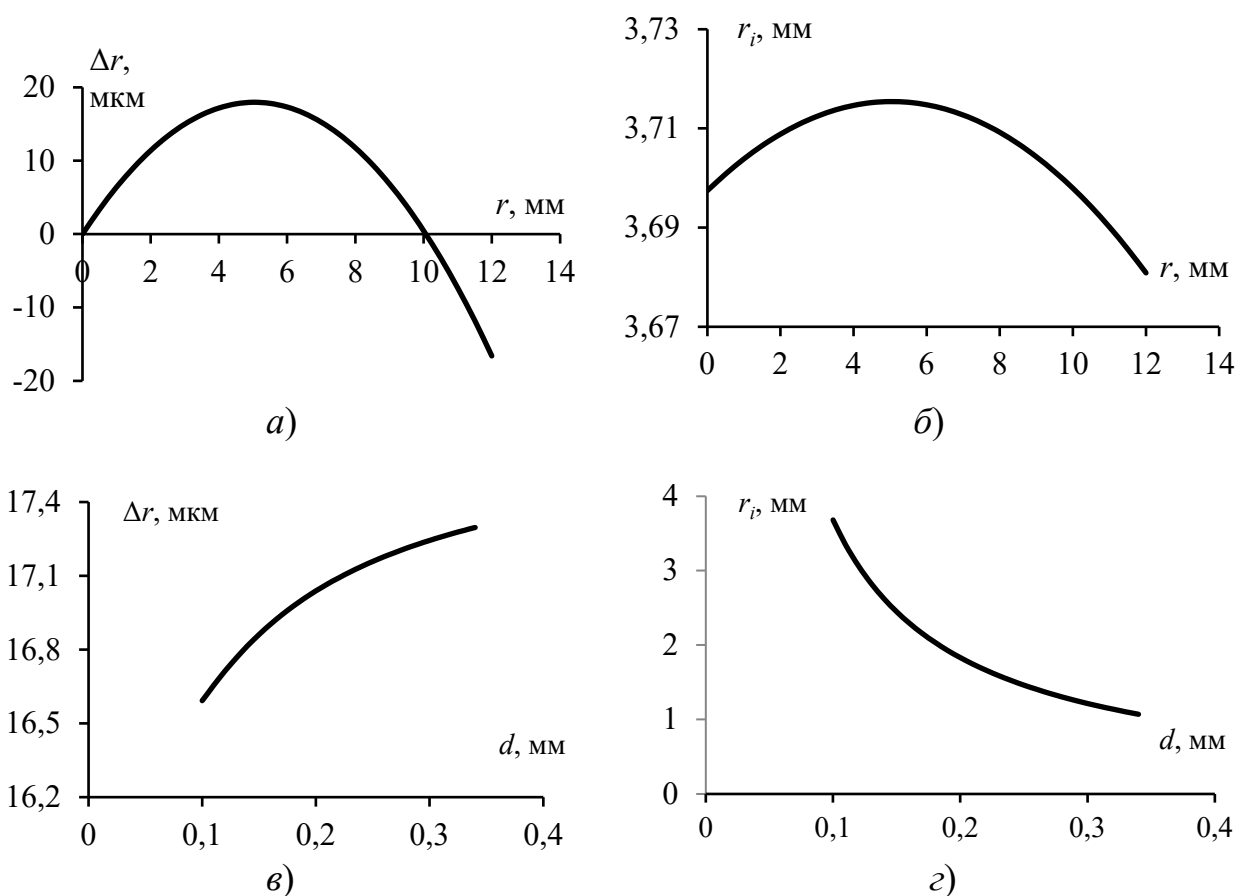


Рис.3. Расчетные зависимости ширины  $\Delta r$  и радиуса  $r_i$  светящейся окружности от изменения радиуса  $r$  кривизны и периода  $d$  дифракционной структуры аксикона

Таким образом, показано, что толстый дифракционный аксикон формирует безаберрационное внеосевое изображение точки схождения сферической волны в виде светящейся тонкой окружности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mcleod J.H. The axicon: a new type optical element // JOSA. 1954. – N. 44. – P. 592.
2. Наливайко В. И., Пономарева М. А. Формирование оптических аксиконов с максимальными фокусными отрезками // Автометрия – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 89 – 94.
3. Хонина С. Н., Савельев Д. А., Применение аксиконов в изображающих системах для

увеличения глубины фокуса // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. – N. 13(6). – С. 7–15.

4. Davidson N., Friesem A. A., Hasman E. Holographic axilens: High resolution and long focal depth // Opt. Lett. 1991. – 16. Is. 7. – P. 523–525.

5. Пальчикова И. Г. «Бездифракционные пучки» и их каустики // Компьютерная оптика. – 1996. – № 16. – С. 35–39.

6. Батомункуев Ю. Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов // Монография. – Новосибирск. – СГУГиТ. – 2020. – С. 195.

© Ю. Ц. Батомункуев, В. И. Наливайко, 2025