

Влияние глубины скругления верхушки аксикона на характер осцилляций осевой интенсивности бесселева светового пучка

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

¹*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск,*

e-mail: a.ryzhevich@dragon.bas-net.by

²*Белорусский государственный университет, Минск*

В работе произведен анализ влияния неидеальности формы конической линзы (аксикона) в области верхушки конуса на осцилляции интенсивности вдоль оптической оси формируемого этим аксиконом бесселева светового пучка, вызванные интерференцией излучения, прошедшего через скругление аксикона и излучения, преломленного конической поверхностью. Показано, что чем больше глубина скругления, тем дальше начинает формироваться бесселев световой пучок, и тем короче становится область его существования. Можно подобрать такую конфигурацию аксикона, при которой первый пик осцилляций будет превосходить по значению интенсивности все остальные. При увеличении глубины скругления увеличивается расстояние между первыми двумя пиками осевой интенсивности, причем эта зависимость довольно близка к прямой пропорциональности.

Ключевые слова: аксикон, коническая поверхность, гипербола, бесселев световой пучок, осцилляция интенсивности.

Введение

Конические линзы (аксиконы) уже несколько десятков лет широко используются для формирования бесселевых световых пучков (БСП) [1]. Аксиконы, поверхности которых полируются алмазным порошком, имеют форму, отличающуюся от идеально конической. Одним из отличий является наличие скругления на верхушке аксикона [2–5] (мы употребляем здесь именно слово верхушка (верхняя часть), а не вершина (самая верхняя точка)). Имеются и другие отличия, например, биения угла при основании конической поверхности по азимутальной координате [2, 6], но в данной работе детально исследовано влияние глубины скругления верхушки аксикона на характер осцилляций интенсивности на оси бесселева светового пучка, который формирует данный аксикон. Впервые наличие осцилляций в осевом распределении интенсивности БСП было показано в работе [7], а причиной их формирования в используемой в [7] схеме с кольцевой диафрагмой и линзой указывается дифракция на апертуре линзы. В статьях [3, 4], было установлено, что при формировании БСП в схеме с аксиконом, осцилляции осевой интенсивности вызываются отличием формы аксикона от конуса, выражающимся в виде скругления верхушки и приближающим аксикон по форме к гиперболоиду. В таком случае осцилляции можно объяснить интерференцией излучения, проходящего через скругление на верхушке аксикона, подобное сферической линзе (сферическая компонента), и излучения, прошедшего через коническую поверхность (коническая компонента). Осцилляции появляются из-за того, что при изменении продольной координаты изменяется разность фаз между конической и сферической компонентами, причем эта зависимость имеет почти линейный характер благодаря тому, что форма аксикона всё же близка к конической.

Описание и результаты численного эксперимента по моделированию бесселева светового пучка

Световое поле за неидеальным аксиконом, форма которого показана на рис. 1, рассчитывалось нами с помощью преобразований Ханкеля по схеме из [3]. Форма реального аксикона при расчетах описывалась гиперболоидом вращения в соответствии с [3, 8]. Изменяемым являлся параметр a – глубина скругления (рис. 1). Сферическая часть поверхности аксикона образована частью гиперболоида, имеющей наибольшее

отклонение от конуса с тем же углом раствора, что и у асимптот гиперболы. Предполагается, что на аксикон падает гауссов световой пучок, диаметр которого в 3 раза меньше диаметра аксикона, а аксикон находится в перетяжке гауссова пучка. Аксикон полагается тонким. Поскольку для практических применений в большинстве случаев наиболее важным является осевой максимум интенсивности, имеющий наибольшее значение во всех поперечных плоскостях зоны существования БСП, нами были рассчитана именно интенсивность вдоль оптической оси БСП.

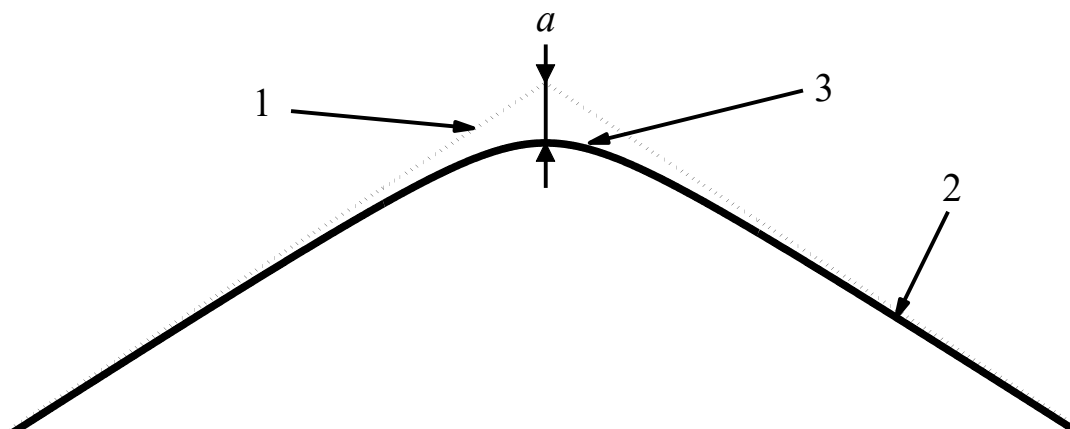


Рис. 1. – Используемая при моделировании светового поля форма аксикона: 1 – прямая образующая конической поверхности; 2 – коническая поверхность; 3 – сферическая поверхность скругления глубиной a .

На рис. 2, *а* показаны рассчитанные нами зависимости осевой интенсивности бesselева светового пучка от продольной координаты z для шести значений глубины скругления a верхушки аксикона (от 0 до 30 микрометров), на рис. 2, *б* – зарегистрированная нами экспериментально зависимость осевой интенсивности БСП от продольной координаты (в [9] была опубликована нами в двухмерном виде).

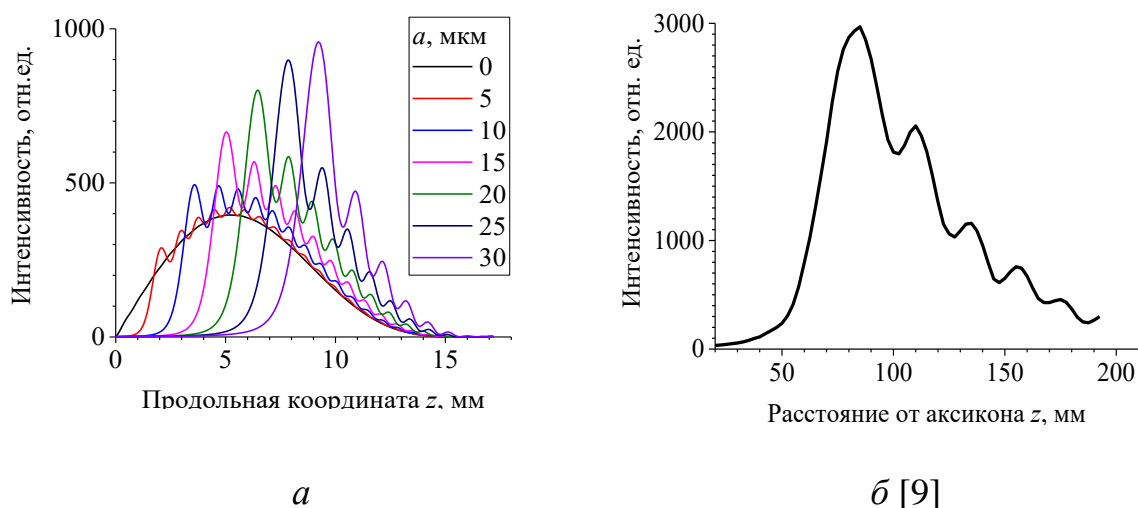


Рис. 2. – Зависимость осевой интенсивности бesselева светового пучка от продольной координаты при разных значениях глубины скругления: *a* – расчет, *б* – эксперимент.

Из рис. 2, *а* видно, что чем больше глубина скругления a , тем дальше начинает формироваться сам БСП, и тем дальше отстоит от аксикона первый пик осцилляции интенсивности, являющийся при этом и наибольшим по значению. Расположение пиков вдоль продольной координаты не эквидистантное. По всей видимости, это обусловлено гиперболической формой аксикона. Неэквидистантность расположения пиков хорошо выражена на экспериментальной зависимости (рис. 2, *б*). Неочевидным, но полезным результатом является тот факт, что чем больше глубина скругления аксикона, тем более высокое значение имеет первый пик осцилляции, что бывает важно для некоторых видов лазерной обработки. Начиная с некоторой глубины скругления первый пик осцилляций превосходит по значению интенсивности все остальные. Зависимость расстояния между аксиконом и первым пиком осцилляции показана на рис. 3, *а*. При увеличении этого расстояния зона существования БСП укорачивается.

Интересно, что продольные расстояния между пиками осцилляции также зависят от глубины скругления a : чем больше глубина скругления, тем дальше от первого находится второй пик. Зависимость расстояния между первым и вторым пиками от a показана на рис. 3, *б*.

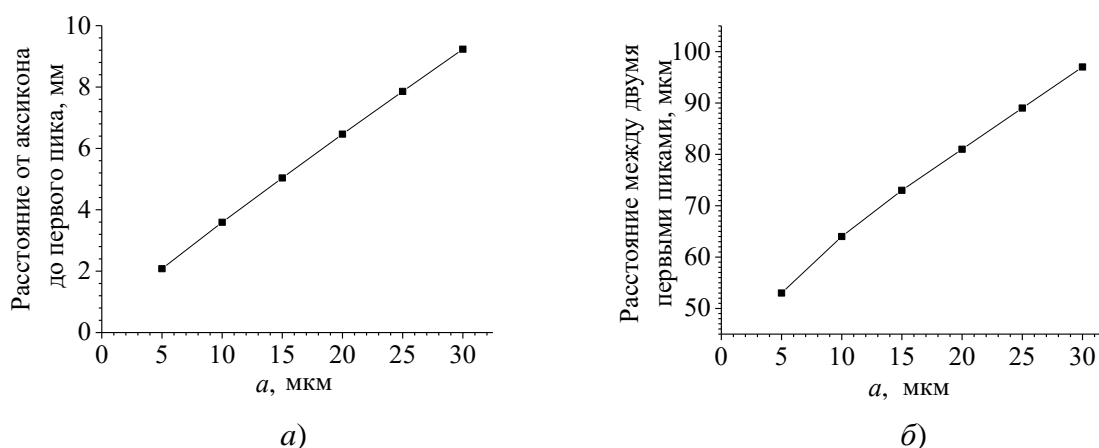


Рис. 3 – Зависимости характерных расстояний в осевом распределении интенсивности от глубины скругления вершины аксикона: *а* – между аксиконом и первым пиком осцилляций; *б* – между первым и вторым пиками осцилляций.

Из рис. 3, *б* видно, что зависимость расстояния между первым и вторым пиками осцилляции близка к прямой пропорциональности.

Закключение

При использовании для формирования БСП аксиконов с большей глубиной скругления вершины возможно достигать более высокой концентрации световой энергии в первом максимуме осевых осцилляций интенсивности. При этом формирование этого пика происходит на большем расстоянии от аксикона, а следующий пик осцилляций находится на большем расстоянии от первого. Неэквидистантность пиков осцилляций свидетельствует о близости формы аксикона к гиперболической, что может быть использовано для оценки качества аксиконов по критерию отличия их формы от конической.

Благодарности

Настоящая работы была выполнена в рамках задания 1.1.01 «Разработка физических основ распространения и преобразования квазибездифракционных

вихревых световых пучков нового типа в анизотропных, неоднородных и рассеивающих средах и создание на этой основе инновационных диагностических оптико-электронных устройств» (№ гос. регистрации 20160091) ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (2016–2020 гг.) и задания 1.1 «Разработка методов и устройств диагностики материалов, процессов и изделий в оптическом и терагерцовом диапазонах спектра и их применение для оптической связи, микроскопии и определения характеристик различных объектов» (№ гос. рег. 20210300 от 23.03.2021) ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (2021–2025 гг.)

Литература

1. Scott G. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon. *Optical Engineering*. 1992. № 12 (31). С. 2640.
2. Dudutis J., Gečys P., Račiukaitis G. Non-ideal axicon-generated Bessel beam application for intra-volume glass modification. *Optics Express*. 2016. № 25 (24). С. 28433.
3. Brzobohatý O., Čižmár T., Zemánek P. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon. *Optics Express*. 2008. № 17 (16). С. 12688.
4. Akturk S, Zhou B, Pasquiou B, Franco M, Mysyrowicz A. Intensity distribution around the focal regions of real axicons. *Optics Communications*. 2008. № 17 (281). С. 4240–4244.
5. Wu P., Sui C., Huang W. Theoretical analysis of a quasi-Bessel beam for laser ablation. *Photonics Research*. 2014. № 3 (2). С. 82.
6. Wu F. Effect of elliptical manufacture error of an axicon on the diffraction-free beam patterns. *Optical Engineering*. 2008. № 8 (47). С. 083401.
7. Durnin J., Miceli J. J., Eberly J. H. Diffraction-free beams. *Physical Review Letters*. 1987. № 15 (58). С. 1499–1501.
8. Dépret B., Verkerk P., Hennequin D. Characterization and modelling of the hollow beam produced by a real conical lens. *Optics Communications*. 2002. № 1–6 (211). С. 31–38.
9. Рыжевич А.А., Балыкин И. В., Железнякова Т. А. Параметры качества бesselевых световых пучков нулевого порядка. *ЖПС*. 2018. Т. 85, № 1. – С. 144–153.

Influence of the depth of rounding of the top of the axicon on the nature of the oscillations of the Bessel light beam axial intensity

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

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

² *Belarusian State University, Minsk*

In the paper we analyzed the effect of the imperfect shape of a conical lens in the region of the cone top on the intensity oscillations along the optical axis of the Bessel light beam formed by this axicon, caused by interference of radiation transmitted through the rounding of the axicon and radiation refracted by the conical surface. It is shown that the greater the depth of the rounding, the further the Bessel light beam begins to form, and the shorter the area of its existence becomes. It is possible to choose such a configuration of the axicon, in which the first peak of the oscillations will exceed all the others in intensity. As the rounding depth increases, the distance between the first two peaks of the axial intensity increases, and this dependence is quite close to direct proportionality.

Keywords: axicon, conical surface, hyperbola, Bessel light beam, intensity oscillation