

Влияние скругления вершины аксикона на параметры качества и Фурье-спектр формируемого бesselева светового пучка

А. А. Рыжевич^{1, 2)}, И. В. Балыкин¹⁾, Н. С. Казак³⁾

¹⁾ *Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: a.ryzhevich@dragon.bas-net.by*

²⁾ *Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

³⁾ *ГНПО "Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника", Минск, Беларусь*

С использованием методов Фурье-оптики путем численного моделирования исследовано влияние округлой вершины аксикона на параметры качества формируемого бesselева светового пучка (БСП). Произведен анализ качества Фурье-спектра БСП (ФСБСП) с помощью введенного параметра η , определяющего отношение энергии в конической компоненте к полной энергии пучка. Показано, что сферическая вершина конического в остальном аксикона приводит к формированию отдельной неконической компоненты в спектре, а в случае гиперболического аксикона происходит уширение конической компоненты спектра в направлении низких пространственных частот. Полученные результаты могут быть использованы для быстрого определения формы вершины аксикона.

Ключевые слова: аксикон; бesselев световой пучок; параметры качества бesselева светового пучка; Фурье-спектр.

Influence of axicon tip rounding on quality parameters and Fourier-spectrum of the generated Bessel light beam

A. A. Ryzhevich^{1, 2)}, I. V. Balykin¹⁾, N. S. Kazak³⁾

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

²⁾ *Belarusian State University, Minsk, Belarus,*

³⁾ *SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus*

We studied the influence of rounded axicon tip on the quality parameters of the generated Bessel light beam (BLB) using Fourier optics methods and numerical simulation. The quality of the Fourier spectrum of the BLB (FSBLB) was analyzed using the introduced parameter η , which determines the ratio of the energy in the conical component to the total energy of the beam. We shown that the spherical tip of an otherwise conical axicon leads to the formation of a separate non-conical component in the spectrum, and in the case of a hyperbolic axicon the conical component of the spectrum broadens in the direction of low spatial frequencies. The results obtained can be used to quickly determine the shape of the axicon tip.

Keywords: axicon; Bessel light beam; Bessel light beam quality parameters; Fourier-spectrum.

Введение

Одним из наиболее распространенных методов формирования бesselевых световых пучков (БСП) является преобразование гауссова светового пучка аксиконом. По ряду технологических причин вершина аксикона отличается от идеально конической и как правило имеет округлую форму [1–3], т. е. обладает некоторым

положительным радиусом кривизны, который может быть фиксированным либо изменяться в зависимости от радиальной координаты. В [2] подтверждено, что наличие скругленной вершины в виде гиперboloида вращения приводит к возникновению осевых осцилляций интенсивности в БСП. В [3] рассмотрены распределения интенсивности в области за зоной существования БСП в случае гиперболического аксикона, охарактеризован характер видимых осцилляций и его зависимость от величины скругления. Настоящая работа посвящена вопросу влияния округлости вершины аксикона на качество БСП в области его существования, а также на его Фурье-спектр. В [4] были получены аналитические формулы, задающие осевое распределение интенсивности за аксиконом со скругленной вершущкой, при этом рассмотрены три модели аксикона: гиперболическая, параболически-гиперболическая и параболически-коническая. Для описания качества БСП используются предложенные в [5] параметры качества.

1. Изменение параметра $\langle R^2 \rangle$ при различных типах скругления

Для исследования влияния скругленной вершины аксикона на качество пучка нами рассмотрены две модели аксикона со скругленной вершущкой: конический аксикон со сферической вершущкой (I) и гиперболический аксикон (II). Эти модели выражают два предельных случая – когда скругление строго локализовано на вершущке аксикона и когда отклонение от конической формы присутствует на всей поверхности аксикона. В качестве варьируемого параметра в этих моделях нами выбрана величина глубины скругления a , равная разности между координатами самых «высоких» точек моделируемого аксикона и идеального конического. Форма вершущки для различных значений параметра a в случаях I и II приводится на рис. 1.

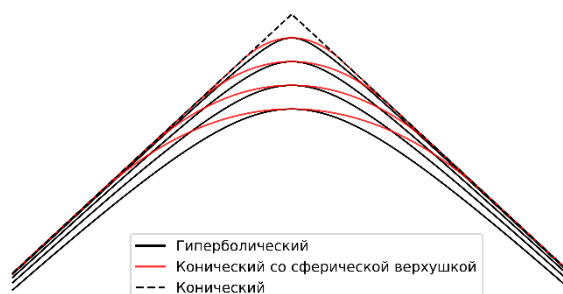


Рис. 1. Осевое сечение аксикона при различных значениях глубины скругления a для конического аксикона со сферической вершущкой и гиперболического аксикона

С использованием методов Фурье-оптики нами рассчитаны поперечные распределения в БСП для различных значений a и z , а также ФСБСП при различных a для обоих видов скругления вершущки аксикона. Характерные распределения интенсивности в БСП для случаев I и II приводятся в таблице 1. Видно, что при достаточно большом числе видимых колец наблюдается периодическая поперечная модуляция распределения интенсивности. При этом при фиксированном значении a эта модуляция более выражена в случае I. Поскольку коэффициенты круглости k_K и постоянства k_{Π} [5] выражают разброс параметров радиальных распределений в БСП вдоль различных азимутальных направлений, в силу симметрии задачи, их значения для

аксикона со скругленной верхушкой всюду близки к 1. Поэтому для оценки отличия наблюдаемого БСП от идеального следует использовать параметр качества $\langle R^2 \rangle$ [5], который в среднем характеризует степень соответствия наблюдаемого распределения интенсивности идеальному. Соответствующий график для случая I приводится на рис. 2, а.

Таблица 1

Распределения интенсивности в БСП в случае конического аксикона со сферической верхушкой (I) и гиперболического аксикона (II) при $a = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м

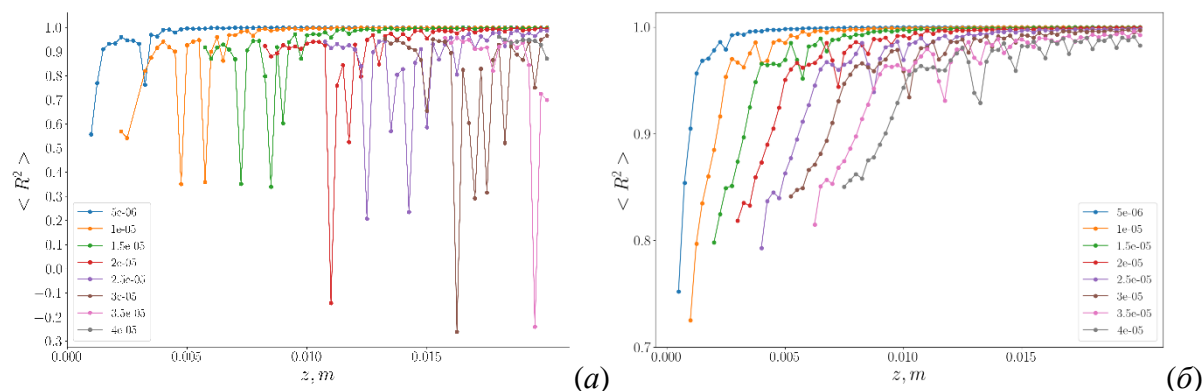
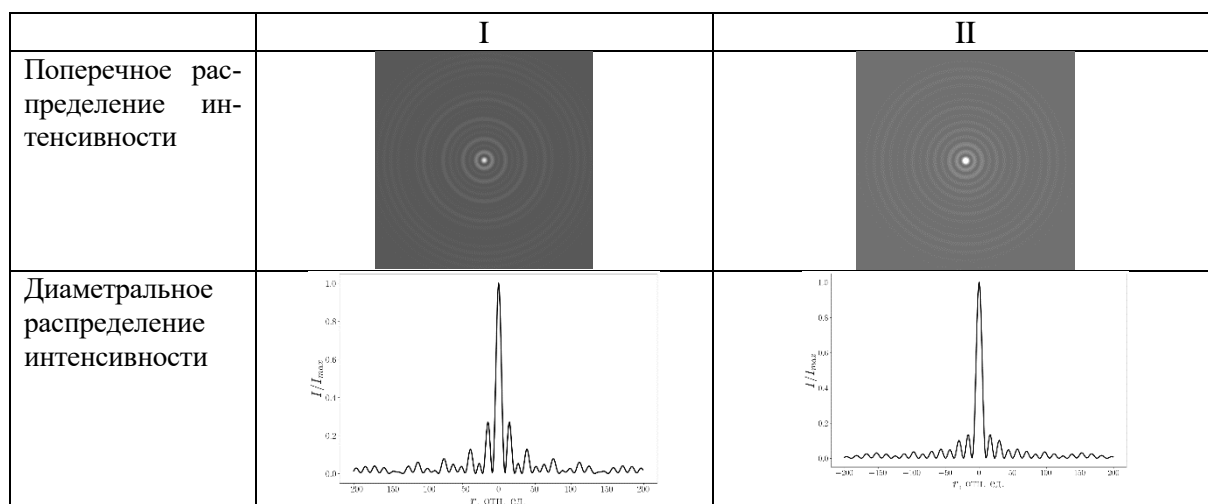


Рис. 2. Зависимость среднего значения скорректированного коэффициента детерминации $\langle R^2 \rangle$ от продольной координаты при различных значениях параметра a для: аксикона со сферической верхушкой (а) гиперболического аксикона (б)

Выбросы на графике соответствуют положениям в пространстве, в которых БСП испытывает наиболее сильную модуляцию в поперечном распределении интенсивности, которая даже может приводить к выравниванию по интенсивности осевого и приосевых максимумов. На начальном этапе наблюдается весьма значительная модуляция в поперечном распределении интенсивности, которая приводит к быстрому чередованию областей, в которых БСП достаточно хорошо описывается квадратом функции Бесселя и областей, в которых интенсивность приосевых и осевого максимума становятся сравнимы и распределение плохо описывается квадратом функции Бесселя.

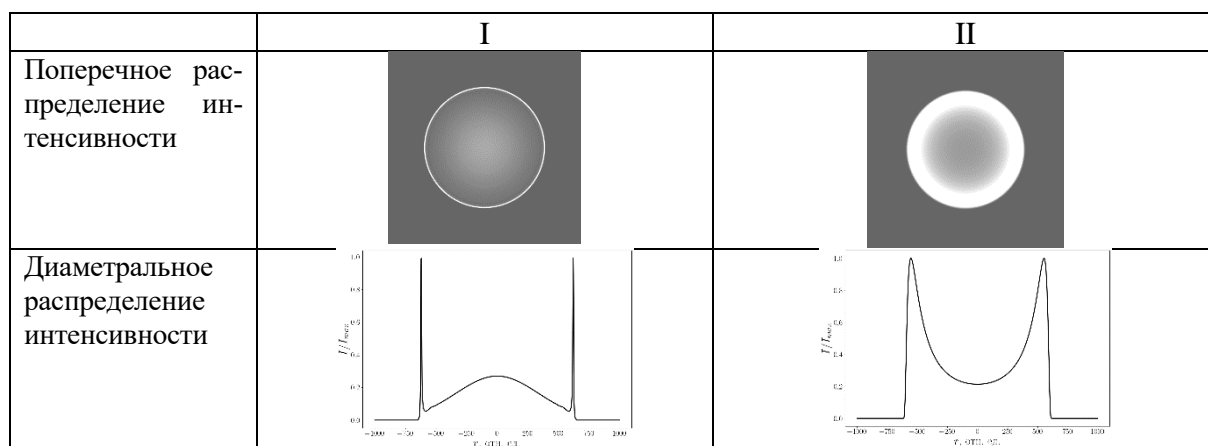
Аналогичные графики построены нами для гиперболического аксикона на рис. 2, б. Как и в случае I, начало области существования БСП отдалается от аксикона с ростом величины a , а возникающие при этом модуляции в поперечном распределении интенсивности приводят к периодическим перепадам $\langle R^2 \rangle$, однако не наблюдается такого существенного снижения качества в отдельных плоскостях.

2. Изменение ФБСП при различных типах скругления

В таблице 2 приведены характерные поперечные и диаметрально распределения интенсивности в ФБСП при различных типах скругления. В случае аксикона со сферической верхушкой при увеличении a в ФБСП возрастает приосевая компонента, формируемая округлым участком поверхности аксикона, при этом явно видно, что эта компонента отделяется от конической. В случае же гиперболического аксикона явно выделяемая приосевая компонента отсутствует, а рост a приводит к увеличению ширины конической компоненты в направлении низких пространственных частот. Это можно объяснить тем, что в формировании ФБСП принимает участие вся поверхность аксикона, а не только его центральная область. Вид ФБСП позволяет быстро определить форму верхушки аксикона.

Таблица 2

Распределения интенсивности в ФБСП в случае конического аксикона со сферической верхушкой (I) и гиперболического аксикона (II) при $a = 0,04$ мм



Для того, чтобы численно охарактеризовать изменения качества ФБСП в зависимости от скругления, необходимо ввести величину $\eta = P_{\text{ring}} / P_{\text{total}}$, характеризующую отношение энергии пучка в конической компоненте спектра P_{ring} к полной энергии пучка P_{total} . Для ее расчета используются параметры главной компоненты радиального распределения в спектре – w и r_c . Далее на основе значений w и r_c формируется, вообще говоря, несимметричное кольцо, описываемое при заданном φ уравнением для r вида $r_c - 3\sqrt{2} w \leq r \leq r_c + 3\sqrt{2} w$. Число $3\sqrt{2}$ выбрано исходя из того, что в интервале $\mu \pm 3\sigma$ для гауссова распределения содержится 99,73 % полной площади под кривой распределения. Для промежуточных между проведенными лучами значений φ используется интерполяция границы кольца линейной спиралью. Далее рассчитывается суммарная энергия P_{ring} , заключенная в этом кольце, как сумма значений пикселей, значение r для которых удовлетворяет уравнению. Затем она делится на полную энергию пучка P_{total} , рассчитываемую как сумму значений всех

пикселей. Зависимость величины η от a для случая I приводится на рис. 3, а. η убывает с ростом a по зависимости вида $\exp(-a^2)$, это объясняется тем, что с ростом a радиус сферического участка аксикона R линейно растет, а, следовательно, энергия в конической компоненте уменьшается, являясь интегралом от $2\pi \int r \cdot \exp(-r^2/w^2) dr$ в пределах от R до ∞ , равным $w^2\pi \exp(-R^2/w^2)$. Для случая II аналогичный график приводится на рис. 3, б. Рост величины η при больших a в этом случае объясняется тем, что ширина конической компоненты возрастает настолько, что кольцо, по которому считается энергия конической компоненты P_{ring} , вырождается в круг. Это наблюдение подтверждается приведенной на рис. 4 зависимостью средней полуширины $\langle w \rangle$ конической компоненты спектра от a .



Рис. 3. Зависимость эффективности преобразования в коническую компоненту спектра от величины скругления аксикона a для аксиконов I (а) и II (б)

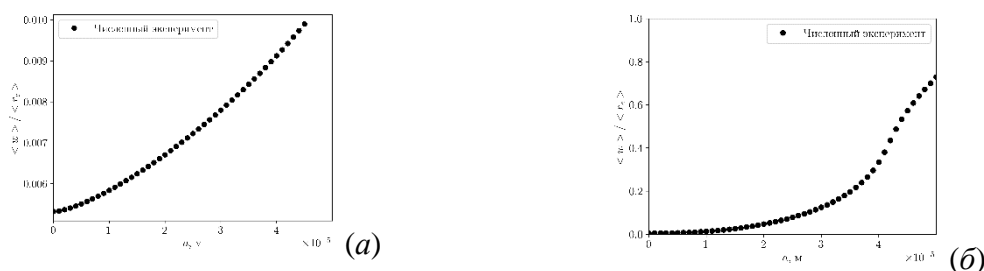


Рис. 4. Зависимость средней полуширины конической компоненты спектра от величины скругления аксикона a для аксиконов I (а) и II (б)

В случае гиперболического аксикона применять параметр η следует с осторожностью, поскольку при больших значениях скругления аксикона a он теряет свой смысл, так как всю энергию пучка можно рассматривать как энергию конической компоненты.

Библиографические ссылки

1. Intensity distribution around the focal regions of real axicons / S. Akturk [et al.] // Optics Communications. 2008. Vol. 281, № 17. P. 4240–4244.
2. Brzobohatý O. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon / O. Brzobohatý, T. Čižmár, P. Zemánek // Optics Express. 2008. № 17 (16). P. 12688.
3. Световые пучки, генерируемые аксиконом с закругленной вершиной / С. Н. Курилкина [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. (на англ.) 2023. Т. 2. С. 14–21.
4. Mylnikov V. Yu., Sokolovskii G. S. Droplet quasi-Bessel beam generated with the round-tip axicon: Exact solutions for different axicon shapes // Optik. 2022. Vol. 268. P. 169797.
5. Рыжевич А. А. Параметры качества бesselовых световых пучков нулевого порядка / А. А. Рыжевич, И. В. Балыкин, Т. А. Железнякова // ЖПС. 2018. Т. 85, № 1. С. 144–153.