

ОЦЕНКА ДЛИНЫ ОПАСНОЙ ЗОНЫ ЗА АКСИКОНОМ ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЛАГЕРР-ГАУССОВА СВЕТОВОГО ПУЧКА В БЕССЕЛЕВ

И. В. Балыкин¹, А. А. Рыжевич^{1,2}, А. П. Макаревич¹

¹*Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь*
E-mail: tol@dragon.bas-net.by

²*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

Бесселевы световые пучки различных порядков находят широкое применение для передачи информации и энергии, дистанционного зондирования. Одним из наиболее популярных способов их формирования, обеспечивающим высокий КПД, является преобразование лаггерр-гауссова светового пучка в бесселев с использованием аксикона. При построении оптических схем, включающих элементы с низкой лучевой прочностью, следует учитывать наличие протяженного осевого (для пучков 0-го порядка) и приосевого (для пучков высших порядков) максимумов интенсивности и размещать оптические элементы за пределами зоны, в которой интенсивность пучка может привести к их разрушению (опасной зоны). В данной работе получены оценки расстояния за аксиконом, на котором интенсивность пучка достигает безопасного уровня для пучков различных порядков.

Ключевые слова: *лаггерр-гауссов световой пучок, бесселев световой пучок, распространение светового пучка, аксикон, безопасная зона.*

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании оптических систем, в которых формируются бесселевы световые пучки (БСП), следует учитывать наличие у БСП нулевого порядка протяженного осевого максимума и протяженного «кольцевого» максимума у БСП высших порядков, обычно обладающего интенсивностью большей, чем максимальная интенсивность падающего на аксикон гауссова или лаггерр-гауссова пучка. При использовании элементов с низкой лучевой прочностью, вопрос оценки размеров области, в которой интенсивность пучка не превышает заданную величину, особенно актуален ввиду широкого использования БСП ([1] и ссылки там). Нами предлагаются оценки длины области, в которой БСП может быть опасен (опасной зоны), полученные на основе численного моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЧКА ЗА АКСИКОНОМ

Схема формирования исследуемого нами светового поля приводится на рисунке 1.

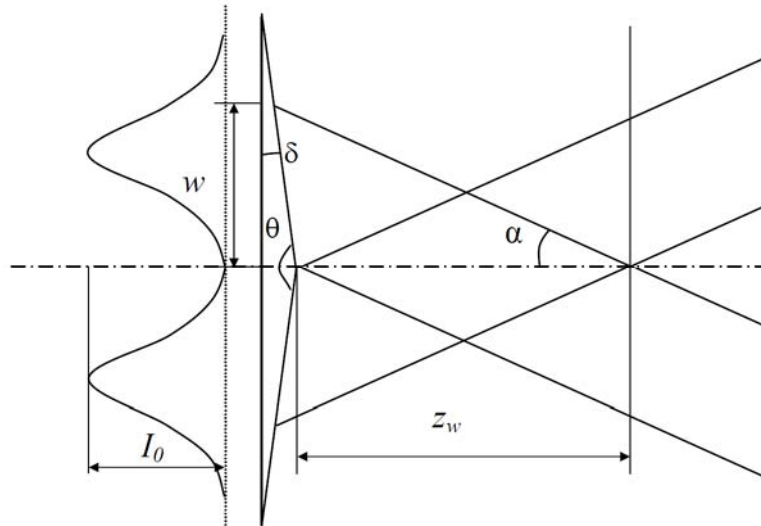


Рис. 1. Схема формирования БСП_{*n*}

Поле, падающее на аксикон, представляет собой лаггерр-гауссов световой пучок целого порядка. Для интенсивности такого пучка можно записать

$$I(r) = I_0 (r/w)^{2n} \exp[-2(r/w)^2], \quad (1)$$

где I_0 – максимальное значение интенсивности, r – радиальная координата, w – полуширина по уровню $1/e^2$ для интенсивности пучка с $n = 0$, n – порядок пучка. Из лаггерр-гауссова светового пучка n -го порядка аксикон формирует БСП n -го порядка. Для корректной оценки ширины входного пучка по заданному порогу интенсивности, которую можно непосредственно измерить в эксперименте с использованием CCD-матрицы или линейки, нами введена величина $w_l(n)$ – полуширина пучка n -го порядка по уровню $1/e^2$ по интенсивности

$$w_l(n) = w \sqrt{-\frac{n}{2} W_{-1}(-e^{-1-2/n})}, \quad (2)$$

где n – порядок пучка, W – W -функция Ламберта.

При моделировании нами фиксировались параметры $w_l = 2500$ мкм и $I_0 = 1$, $\lambda = 633$ нм для входного поля, а также угол $\delta = 5^\circ$ (см. рис. 1) и показатель преломления $n_a = 1,5$ для аксикона. Аксикон полагался тонким. Для нормировки расстояния вдоль оси пучка нами использовалась величина $z_w = w_l / \tan(\alpha)$, $\alpha = (n_a - 1)\delta$. Для моделирования применялись методы Фурье-оптики [2, 3], а также аналитические выражения, приведенные в [4]. В результате моделирования были получены пространственные распределения интенсивности в световых полях, формируемых аксиконном из лаггерр-гауссовых пучков различных порядков n с нулевого по десятый включительно.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ОПАСНОЙ ЗОНЫ ЗА АКСИКОНОМ

Поперечное распределение интенсивности в бесселевом пучке в общем случае выглядит как набор concentрических колец, дополненных в случае БСП₀ осевым максимумом в форме круглого пятна. Будем называть приосевым кольцо, ближайшее к оси пучка, дальним – формируемое аксиконом в дальней зоне, за пределами области существования бесселева пучка, главным максимумом – кольцо (или осевое пятно в случае БСП₀) с наибольшей интенсивностью (главным может являться любое кольцо, в том числе и приосевое, и дальнее). В качестве оценки длины опасной зоны за аксиконом нами предлагаются две величины – z_E , z_K , впервые введенные для БСП₀ в [5]. Необходимость их введения обусловлена тем, что при $z = z_{w_l}$ интенсивность пучка может быть все еще достаточно высока, что не позволяет использовать величину z_{w_l} как длину опасной зоны.

Определим для БСП_{*n*} точку *E* как положение на оси пучка с координатой z_E , в поперечном распределении интенсивности для которого приосевое кольцо (или осевой максимум в случае БСП₀) является главным максимумом, а во всех плоскостях, для которых $z > z_E$ – не является.

Определим для БСП_{*n*} точку *K* как положение на оси пучка с координатой z_K , в поперечном распределении интенсивности для которого максимальное значение интенсивности в главном максимуме равно максимальной интенсивности падающего на аксикон светового пучка в плоскости аксикона I_0 . Поперечное распределение интенсивности в точках *E* и *K* для БСП₁ показано на рисунке 2.

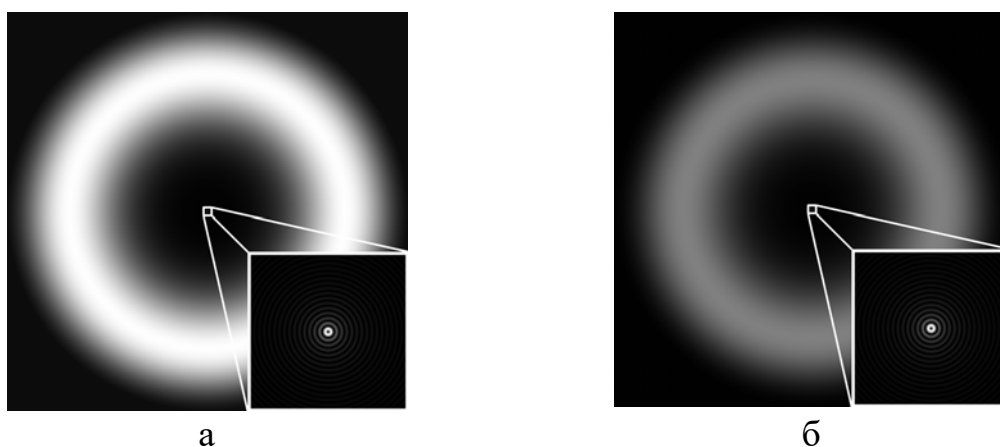


Рис. 2. Поперечное распределение интенсивности в БСП₁, формируемом аксиконом при $z = z_E$ (а) и $z = z_K$ (б), центральный участок вынесен в правую нижнюю часть рисунка в увеличенном виде

На основе полученных в результате моделирования пространственных распределений интенсивности получены оценки величин z_E , z_K , приведенные на графике зависимости z_E , z_K от порядка пучка *n* на рисунке 3.

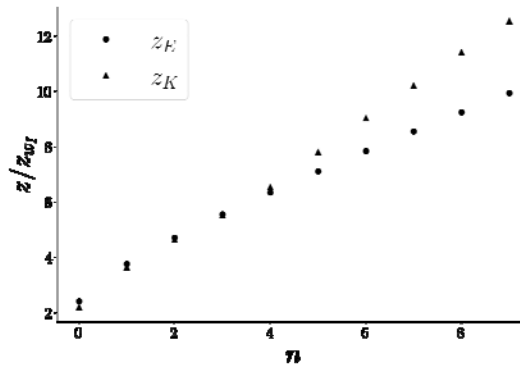


Рис. 3. Зависимость оценок длины опасной зоны z_E , z_K от порядка пучка при одинаковой полуширине w_I

Видно, что длина опасной зоны приблизительно линейно увеличивается с ростом порядка пучка при фиксированной полуширине w_I . Также можно отметить, что оценки z_E , z_K лежат достаточно близко при порядке пучка $n < 5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены зависимости длины опасной зоны за аксиконом при формировании БСП_{*n*} из лагерь-гауссова светового пучка от порядка пучка n . Показано, что длина опасной зоны увеличивается с ростом порядка пучка. Отмечено, что оценки величин z_E , z_K , определяющих положение начала безопасной зоны, достаточно близки между собой при порядке пучка $n < 5$. Эти оценки могут быть полезны при построении оптических схем, включающих элементы с низкой лучевой прочностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Khonina S. N. Bessel Beam: Significance and Applications // *Micromachines*. 2020 V. 11. № 11 P. 997. DOI: 10.3390/mi11110997
2. Ross A. J., Alejo A., Boetticher A., et al. Numerical modelling of chromatic effects on axicon-focused beams used to generate HOFI plasma channels // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1596. P. 012049. DOI: 10.1088/1742-6596/1596/1/012049
3. Goodman J. W. Introduction to Fourier optics / New York : McGraw-Hill, 1996. 441 p.
4. Jarutis V., Paškauskas R., Stabinis A. Focusing of Laguerre–Gaussian beams by axicon // *Optics Communications*. 2000. V. 184. № 1. P. 105–112. DOI: 10.1016/s0030-4018(00)00961-5
5. Рыжевич А. А., Балыкин И. В., Хило Н.А. Закономерности формирования и распространения конического светового пучка // *Приборостроение: материалы 13-й междунар. науч.-техн. конф., БНТУ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]*. 2020. С. 440-442.