

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЕССЕЛЕВА СВЕТОВОГО ПУЧКА ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ЕГО ПОПЕРЕЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ

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

¹Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

E-mail: tol@dragon.bas-net.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В настоящее время бесселевы световые пучки (БСП) применяются для нелинейно-оптических преобразований, организации процессов оптических вычислений, передачи информации и энергии, зондирования. Во всех этих случаях важно обеспечить качество БСП и знать их параметр конусности. В данной работе описаны методы определения объективных параметров качества и параметра конусности БСП посредством компьютерного анализа оценок спектральной плотности мощности (СПМ) одномерных распределений интенсивности, полученных в поперечной плоскости пучка вдоль линии, проходящей через ось пучка (диаметральных распределений) из поперечных двумерных распределений интенсивности БСП, зафиксированных в виде цифровых компьютерных изображений.

Ключевые слова: *бесселев световой пучок, параметр конусности, параметр качества, спектральная плотность мощности.*

ВВЕДЕНИЕ

Бесселевы световые пучки m -го порядка (БСП $_m$) представляют собой аксиально симметричные световые поля, вид поперечного распределения интенсивности в которых описывается функцией вида

$$I(x) = A^2 J_m^2(q_0 x), \quad (1)$$

где A – скалярная амплитуда поля, J_m – функция Бесселя 1-го рода m -го порядка, параметр конусности $q_0 = k\gamma$, $k = 2\pi/\lambda$, γ – угол конусности БСП, λ – длина волны светового излучения, x – диаметральный координата, обозначающая положение вдоль линии, проходящей через ось пучка в поперечной плоскости пучка (при этом $x = 0$ соответствует положению на оси пучка). Формула (1) задаёт вид диаметрального распределения интенсивности идеального БСП $_m$, в то время как реальный БСП имеет подобное по внешнему виду, но неидеальное экспериментальное распределение интенсивности, которое может быть зарегистрировано ПЗС-матрицей, линейкой либо другим прибором. Для описания экспериментального распределения интенсивности к величинам, фигурирующим в формуле (1) (A , q_0 , начало отсчета x), необходимо добавить дополнитель-

ные параметры, характеризующие близость пучка к идеальному или степень его практической пригодности – параметры качества. Анализируя экспериментальное распределение интенсивности БСП в заданном поперечном сечении, с использованием разработанной авторами компьютерной программы, можно оценить эти параметры и выбрать на их основе оптимальную конфигурацию оптической схемы, что бывает необходимо при организации процессов нелинейно-оптических преобразований, оптических вычислений, передачи информации и энергии, зондирования.

ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА БСП

Для оценки качества световых пучков гауссова типа обычно применяется параметр M^2 . Поскольку БСП представляет собой интерференционное световое поле, локализованное в ромбоиде, волновые вектора поля лежат на конусе, а размеры осевого (для БСП нулевого порядка) или приосевого (для БСП высших порядков) максимума интенсивности определяются только длиной волны излучения и параметром конусности, применять для оценки качества БСП параметр M^2 некорректно. В [1] нами были впервые предложены критерии для объективной численной оценки качества бесселевых световых пучков нулевого порядка (БСП₀). В результате достаточно долгой экспериментальной практики нами было замечено, что несовершенство БСП₀ по части аксиальной симметрии проявляется прежде всего в его первом кольцевом максимуме интенсивности, окружающем осевой максимум, причем нарушения симметрии могут проявляться как в отклонении формы этого максимума от идеальной окружности, так и в значении его пиковой интенсивности вдоль каждой конкретной радиальной линии. Первый кольцевой максимум является следующим по величине от осевого, поэтому нами были введены следующие параметры качества БСП: коэффициент постоянства k_{Π} , оценивающий постоянство пикового значения интенсивности первого (а значит и всех последующих) кольцевого максимума интенсивности БСП₀, и коэффициент круглости k_K , оценивающий равноудаленность от оси пучка точек, соответствующих пиковому значению интенсивности первого максимума интенсивности и лежащих на различных радиальных линиях. Коэффициент круглости по модулю среднего отклонения от среднего радиуса первого максимума рассчитываем, как

$$k_K^{\Delta} = 1 - M \left[\frac{|r_1 - M[r_1]|}{M[r_1]} \right], \quad (2)$$

где r_1 – радиус первого кольцевого максимума интенсивности анализи-

руемого БСП₀, а $M[]$ здесь и далее обозначает усреднение по всему ансамблю радиальных распределений, оптимальное количество которых равно 12 [1].

Коэффициент постоянства первого кольцевого максимума по отклонению модуля от среднего значения пиковой интенсивности определяется по формуле:

$$k_H^\Delta = 1 - M \left[\frac{|I_H(r_1) - M[I_H(r_1)]|}{M[I_H(r_1)]} \right], \quad (3)$$

где $I_H(r_1)$ – нормированная на осевой максимум пиковая интенсивность первого кольцевого максимума поперечного распределения экспериментального БСП вдоль некоторого радиального луча.

В дополнение к этим двум параметрам для того, чтобы в целом охарактеризовать степень соответствия распределения интенсивности в каждом поперечном сечении квадрату функции Бесселя, нами был введен параметр $R_{cp}^2 = M[R^2]$, т. е. математическое ожидание скорректированного коэффициента детерминации R^2 для аппроксимации радиального распределения интенсивности реального БСП₀ квадратом функции Бесселя нулевого порядка.

Для разработки методики определения параметров качества БСП_m посредством анализа цифрового изображения двумерного поперечного распределения интенсивности мы обобщили и адаптировали шаги алгоритма из методики определения параметров качества БСП₀, модифицировав шаг оценки положения оси пучка, поскольку на оси экспериментальных БСП высших порядков, в отличие от БСП₀, находится локальный минимум интенсивности, не являющийся при этом абсолютным минимумом распределения [2].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА КОНУСНОСТИ БСП

Угол γ и соответственно параметр конусности q_0 БСП данной длины волны λ определяют диаметр (при)осевого максимума интенсивности БСП. Поэтому, проведя аппроксимацию вдоль 12 радиусов экспериментального распределения интенсивности БСП, можно достаточно точно решить обратную задачу и определить параметр конусности q_0 БСП. Кроме того, в [3] нами показано, что проведя дискретное преобразование Фурье изображения экспериментального БСП и проанализировав спектральную плотность мощности (СПМ) диаметрального распределения интенсивности БСП, можно не только быстро оценить q_0 , но и определить порядок БСП, чтобы сразу корректно выбрать порядок функции Бесселя m и начальное приближение q_0 для ускорения процесса аппрок-

симации. Порядок БСП равен числу нулей в СПМ от нулевой частоты до верхней границы спектра экспериментального диаметального распределения интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитываемые в результате компьютерного анализа распределений интенсивности параметры качества БСП вместе с параметром конусности являются объективными численными характеристиками экспериментально полученных пучков и численно описывают их важнейшие свойства, поэтому могут использоваться для оценки пригодности экспериментально формируемых БСП для решения тех или иных практических задач, где требуются высокий контраст осевого максимума, имеющего определенный размер, по отношению к кольцевым и осевая симметрия пучка по форме и по интенсивности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа 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, опто- и микроэлектроника» (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.).

Авторы благодарят коллег Н.А. Хило и В.Н. Белого за полезные замечания в процессе обсуждения работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ryzhevich A. A., Balykin I. V., Zheleznyakova T. A. Quality Parameters of Zero-Order Bessel Light Beams // Journal of Applied Spectroscopy. 2018. V. 85, № 1. P. 134-142. DOI: 10.1007/s10812-018-0623-7
2. Ryzhevich A.A., Balykin I. V., Zheleznyakova T. A. Determination of the Quality Parameters of Higher-Order Bessel Light Beams // Journal of Applied Spectroscopy. 2021. V. 88, №5 P. 1020-1034. DOI: 10.1007/s10812-021-01274-5
3. Рыжевич А. А., Балыкин И. В. Определение параметра конусности бесселева светового пучка посредством Фурье-анализа диаметального распределения интенсивности // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2022. №1. С. 20-34. DOI: 10.33581/2520-2243-2022-1-20-34