

Проектирование преобразователя лазерного излучения типа Focal-piShaper методом геометрического картирования

Я. В. Терло, А. О. Вознесенская

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе демонстрируется метод моделирования преобразователя лазерного излучения типа *Focal-piShaper* на основе геометрического картирования лучей. Разработанный алгоритм позволяет одновременно моделировать две поверхности свободной формы с осевой симметрией, обеспечивающих геометрическое преобразование профиля лазерного одномодового пучка (TEM_{00}) в профиль вида «Диск Эйри» («Картина Эйри»), с высокой точностью. Результаты проверяются путем моделирования прибора в *Zemax OpticStudio*.

Ключевые слова: Оптика, Лазер, Преобразователь, Интенсивность, Поверхности свободной формы, Геометрическое картирование.

Цитирование: Терло, Я. В. Проектирование преобразователя лазерного излучения типа Focal-piShaper методом геометрического картирования / Я. В. Терло, А. О. Вознесенская // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 56–61.

Введение

Производительность многих современных научных и промышленных лазерных приложений увеличивается за счет применения оптики формирования луча, которая используется для создания различных профилей интенсивности излучения. Выбор оптимальной формы пятна и профиля интенсивности лазерного луча зависит от области применения: очень часто требуется получить так называемый профиль с плоской вершиной (*Flat-Top*). На сегодняшний день в мире активно распространяются так называемые *Focal-piShapers*, приборы, позволяющие с большой точностью преобразовывать Гауссово распределение интенсивности в одномодовом пучке TEM_{00} после фокусировки объективом в профиль *Flat-top* высокой интенсивности и малого диаметра [1–3].

1. Поиск аналитических профилей распределения интенсивности

Для канонической координаты η интенсивность рассчитывается через уравнение плотности нормального распределения:

$$f(2\pi\eta) = K \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{(2\pi\eta-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (1)$$

где $\sigma = 1,3523$ – среднеквадратическое отклонение от среднего, высчитывается аналитически из условия равенства интегральной плотности распределений Гауссова пучка и «картины Эйри»; $\mu = 0$ – математическое ожидание (поскольку пучок осесимметричен и не децентрирован); $K = 3,389684$ – масштабный коэффициент.

Для «картины Эйри» интенсивность высчитывается с помощью функции Бесселя первого порядка первого рода, представимую в виде ряда Тейлора около нуля:

$$J_1(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m+2)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+1}, \quad (2)$$

где $\Gamma(m+2) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{m+1} dx$ – гамма-функция Эйлера.

Распределение «картина Эйри» описывается математически формулой:

$$I(\eta) = I_0 \cdot \left(\frac{J_1(2\pi\eta)}{\pi\eta}\right)^2, \quad (3)$$

где I – интенсивность, J_1 – функция Бесселя первого порядка первого рода, η – каноническая координата, $I_0 = 0,59$ – константа.

Таким образом, используя формулы (1) и (3), можно для любой координаты x определить интенсивность лазерного пучка на входе и выходе из преобразователя. Далее решается обратная задача по расчету распределения лучей в профиле пучка относительно его интегральной плотности.

Шаг по плотности интенсивности в полупрофиле неравномерен: первые 250 лучей вычисляются с шагом в 0,0038 отн.ед., а следующие 250 – с шагом в 0,0002 отн.ед. Подобное решение позволяет получить больше точек для областей «колец Эйри», повышая точность моделирования поверхности – таким образом, на моделирование первого, второго, третьего и четвертого колец диска Эйри приходится столько же точек, сколько и на «ядро».

Из технологических соображений сохранение более двух колец Эйри не требуется, поэтому последний трассируемый луч будет приходить в конец второго кольца. Итого, выборка будет содержать 1001 луч (два одинаковых, ввиду осесимметричности системы, набора по 500 лучей и одного осевого луча).

Так как нормированные профили несколько не соотносятся по размерам (10 кан.ед. у Гаусса против 24 кан.ед. у «картины Эйри»), было решено расширить диапазон для Гаусса в два раза, до 20 кан.ед. Это также является одним из условий при конструировании преобразователя лазерного излучения – близкое к единице увеличение в зрачках. Итоговые аналитические профили пучков (в пересчете на реальные единицы измерения, мм) представлены на рисунке 1.

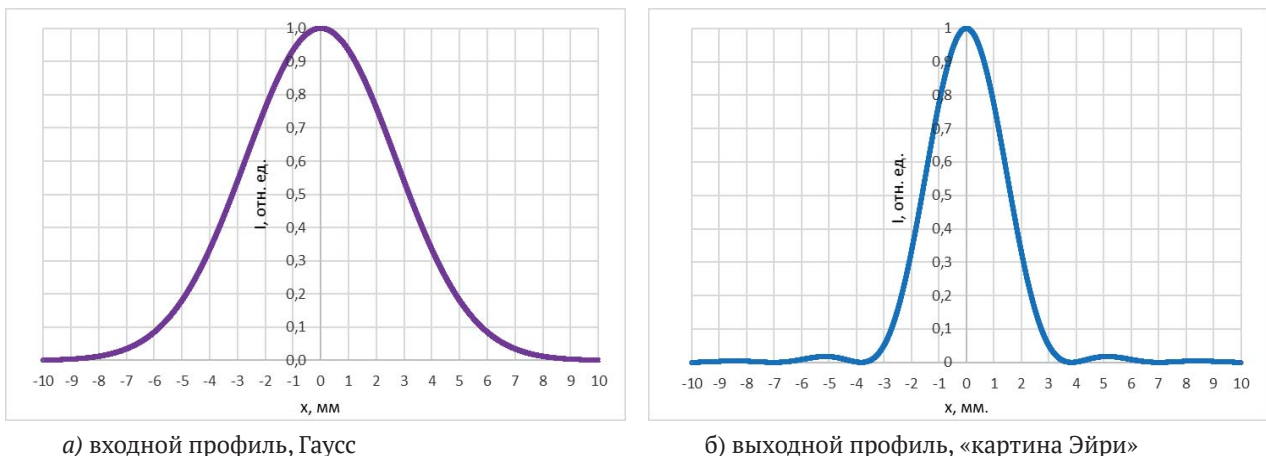


Рис. 1. Общий вид профилей распределения интенсивности

2. Расчет поверхностей свободной формы преобразователя типа Focal-πShaper

Алгоритм расчета поверхностей свободной формы при подаче на вход Гауссова пучка и введении условия о сферической форме входной/выходной граней преобразователя представлен на рисунке 2. Он основан на принципе геометрического картирования (ray mapping), подробно описанный в работе [4].

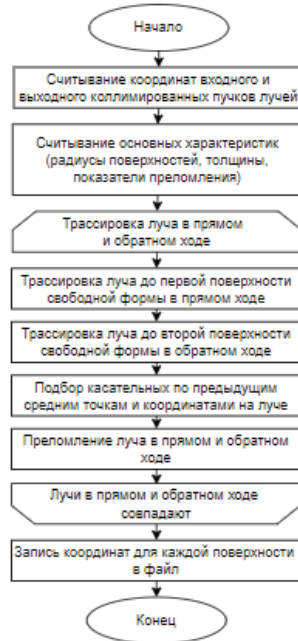


Рис. 2. Общий вид алгоритма расчета поверхностей свободной формы с осевой симметрией

После трассировки луча до первой поверхности свободной формы в прямом ходе, для предыдущей средней точки (z_1, y_1) ищется такая точка (Z_1, Y_1) , чтобы в ней после преломления от поверхности, выраженной уравнением касательной с коэффициентами

$$k_1 = \frac{Y_1 - y_1}{Z_1 - z_1}, \quad (4)$$

$$b_1 = y_1 - kz_1, \quad (5)$$

найти коэффициенты луча k и b . Соответственно, после этого ищется пересечение с лучом в обратном ходе на второй поверхности свободной формы.

Одновременно для второй поверхности находится точка (Z_2, Y_2) через известную среднюю точку (z_2, y_2) и коэффициент k_1 (т.к. должно выполняться условие коллимированности пучков, входная и выходные грани плоские, а показатели преломления материалов одинаковы). Если полученная координата Z_2 больше, чем координата точки пересечения преломленного луча, то Z_1 уменьшается, в противном случае – увеличивается.

Повторяя итерационно этот процесс можно добиться совпадения точек и, следовательно, выполнить условие трассирования луча в прямом и обратном ходе. После чего ищутся следующие пары средних точек через известные координаты (Z_2, Y_2) , (z_2, y_2) и коэффициент k_1 , и процесс повторяется для нового набора высот Y .

3. Моделирование преобразователя и добавление к нему фокусирующей линзы

Оба компонента преобразователя моделируются с помощью программного обеспечения для CAD-моделирования *SolidWorks*. После чего обе модели в формате *STEP*-файлов подгружаются в *Zemax* как *Non-Sequential Components*. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

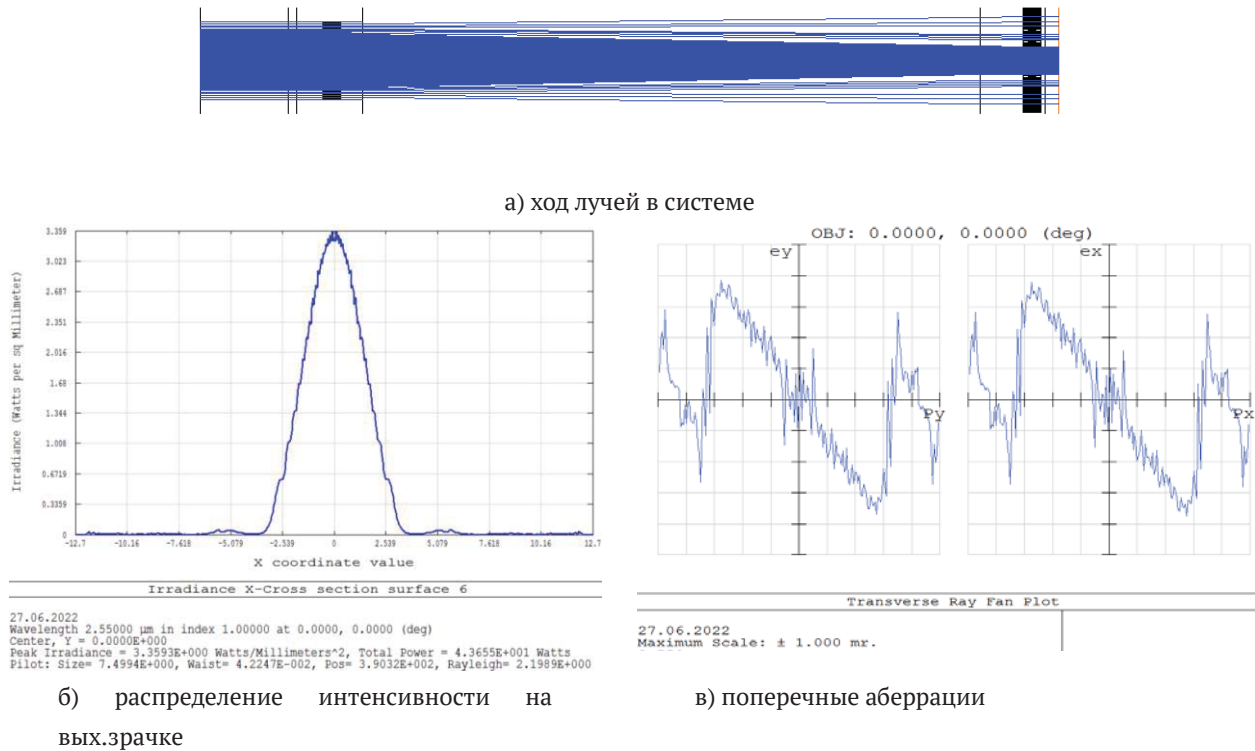


Рис. 3. Результат моделирования преобразователя

Чтобы оценить погрешность воспроизведения преобразования, необходимо рассчитать СКО разности, нормированной к единице интенсивности, полученной в результате моделирования, и теоретической интенсивности для «картины Эйри». Расчет СКО производится по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (\Delta I_i - \bar{\Delta I})^2}{n - 1}}, \quad (6)$$

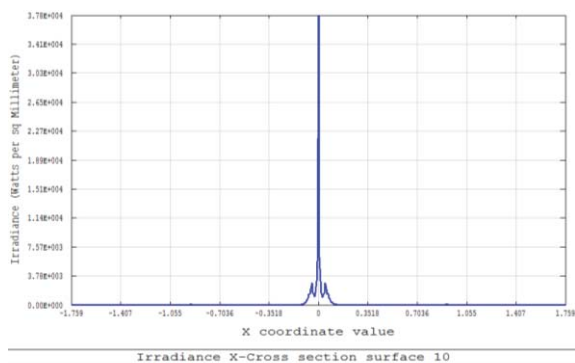
где ΔI_i – разность нормированных интенсивностей аналитически рассчитанной и смоделированной для луча i , n – общее количество лучей (в данном случае 512).

С учетом того, что профиль в виде «картины Эйри» отнормирован таким образом, чтобы интеграл от него давал 2 Вт/мм², его СКО $\sigma = 0,018$ Вт/мм², что составляет меньше 1%. Это, как и малые величины поперечной aberrации позволяет говорить о высоком качестве полученной системы и функциональности разработанного алгоритма.

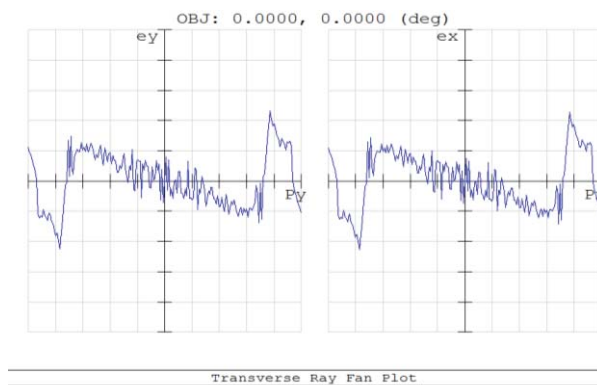
Focal-πShaper работает в паре с фокусирующим объективом [2]. Для завершения моделирования добавляется линза из селенида цинка с фокусным расстоянием $f = 50$ мм. Финальная схема представлена на рисунке 4.



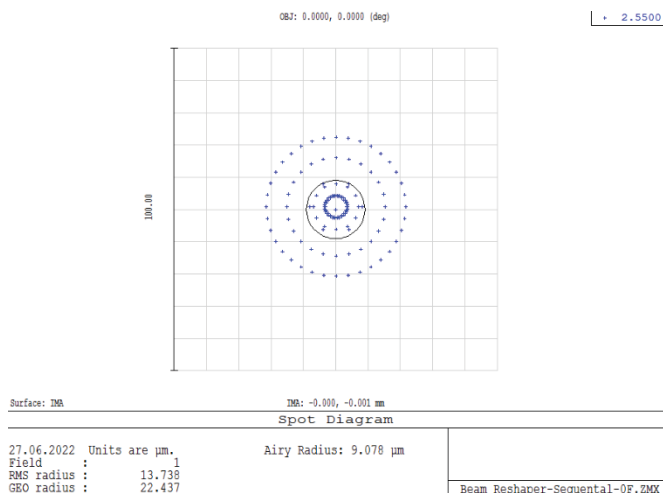
а) ход лучей в системе



б) интенсивность в области фокуса объектива



в) поперечные aberrации



г) пятно рассеяния

Рис. 4. Результат моделирования преобразователя

Боковые всплески за пределами диска Эйри вызваны остаточными aberrациями в системе. Заметно, как сильно возросла интенсивность в пике пучка после фокусировки, а aberrации равномерны по всему зрачку, что подтверждает теорию, связанную с особенностями шейперов данного типа [1–3].

Заключение

В работе представлен метод проектирования преобразователя лазерного излучения типа *Focal-πShaper* на основе метода геометрического картирования лучей через

одновременно моделируемые пару поверхностей свободной формы с осевой симметрией. Анализ абберационных свойств и результирующего профиля распределения интенсивности подтверждает высокую точность метода синтеза преобразователя и сходится с основными теоретическими положениями с точностью до остаточных погрешностей моделирования элементов преобразователя.

Благодарности

Работа поддержана грантом НИР МА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список источников

- [1] Laskin A., Laskin V. Variable beam shaping with using the same field mapping refractive beam shaper //Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV. – SPIE, 2012. – Т. 8236. – С. 81-90.
- [2] Ласкин А. В. и др. Формирователи профиля интенсивности лазерных пучков //Фотоника. – 2018. – Т. 12. – №. 2. – С. 178-190.
- [3] Laskin A., Laskin V., Ostrun A. Refractive beam shapers for optical systems of lasers //Components and Packaging for Laser Systems. – SPIE, 2015. – Т. 9346. – С. 162-171.
- [4] Bruneton A. et al. Limitations of the ray mapping approach in freeform optics design //Optics letters. – 2013. – Т. 38. – №. 11. – С. 1945-1947.

Designing laser beam intensity profile shaper (Focal-piShaper) using ray mapping

Y. V. Terlo, A. O. Voznesenskaya

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The work demonstrates a method for modeling a laser beam intensity profile shaper (Focal-piShaper) based on ray mapping. The developed algorithm makes it possible to simultaneously calculating two freeform surfaces with axial symmetry, which provide a geometric transformation of the profile of single-mode laser beam (TEM₀₀) into an «Airy disk» ("Airy pattern") profile with high accuracy. The results are verified by modeling shaper in Zemax OpticStudio.

Keywords: Optics, Laser, Shaper, Intensity, Freeform surfaces, Ray mapping.