

ВЛИЯНИЕ АБЕРРАЦИЙ НА ПОЛЕ М-МОД В ЛАЗЕРАХ С АКТИВНЫМ ОБЪЕМОМ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

© В.И.Воронов

Лазеры с активным объемом кольцевого сечения обычно работают на многоходовых модах (M -модах), лучевые потоки которых падают на зеркала под углом $[1-5]$. В некоторых лазерах $[3,5]$ отражающие поверхности имеют сложную форму, что в итоге может вызвать абберрационные искажения мод. В этих условиях методы расчета поля, не учитывающие абберраций, такие как метод лучевых матриц $[6]$, дают значительные погрешности.

В данной работе представлен новый подход, позволяющий при действии абберраций определить координатный эйконал резонаторов, а затем использовать его для анализа структуры мод с помощью стандартных процедур решения интегральных уравнений $[7]$.

В основе подхода лежат формулы оптико-геометрического расчета хода лучей, например формулы Федера $[8]$. Данные формулы кроме координат точек встречи с оптическими поверхностями позволяют определить и длину пути между ними вдоль каждого из лучей. Это дает возможность найти и эйконал, связывающий экстремальными путями координаты точек на поверхностях. Однако основная трудность заключается в том, что заданными в этих формулах являются только исходные координаты лучей и их направляющие векторы. В какую точку конечной поверхности придет луч, заранее неизвестно. В то же время выражение для эйконала должно содержать координаты любых начальных и конечных точек в пределах анализируемых областей на оптических поверхностях.

Указанная трудность не является принципиальной, поскольку ничто не мешает определить экстремальные пути между заданными исходными и расположенными нерегулярно конечными точками прихода лучей, а затем аппроксимировать (например, методом наименьших квадратов $[9]$) полученную зависимость рядом по степеням поперечных координат исходной и конечной поверхностей.

Рассмотрим применение метода для анализа структуры M -метод в резонаторе с коноидным зеркалом $[3,5]$. На основании результатов работы $[5]$ можно считать, что для одно-

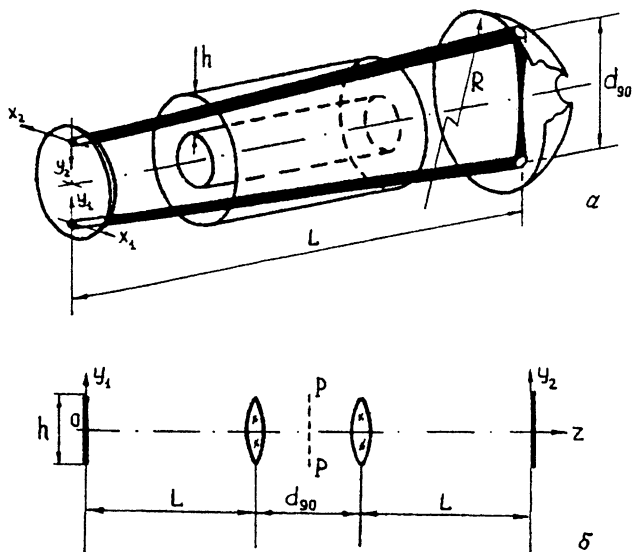


Рис. 1.

го периода прохождения по резонатору (от плоского зеркала до этого же зеркала) лучевая трасса M -моды расположена в меридиональной плоскости. Поскольку резонатор осесимметричен, то в первом приближении ограничимся анализом эйконала только для этой плоскости. В этом случае структура резонатора и ход лучевых потоков в нем могут быть представлены рис. 1, а. На этом рисунке L — длина резонатора, d_{90} и R — соответственно диаметр девяностоградусного раствора и радиус кривизны коноидного зеркала, h — апертура резонатора. На рис. 1, б показана эквивалентная схема, используемая при расчете мод методом лучевых матриц [6]. Вследствие оборачивающих свойств коноида оси координат на рис. 1, а для исходной и конечной поверхностей (на плоском зеркале) направлены противоположно друг другу.

Считая систему симметричной относительно осевой линии, запишем выражение для эйконала в плоскости yoz в виде следующего ряда:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}(y_1, y_2) = & a_0 + a_1 y_1^2 + a_2 y_1 y_2 + a_3 y_2^2 + a_4 y_1^4 + a_5 y_1^3 y_2 + \\
 & + a_6 y_1^2 y_2^2 + a_7 y_1 y_2^3 + a_8 y_2^4 + a_9 y_1^6 + a_{10} y_1^5 y_2 + a_{11} y_1^4 y_2^2 + \dots, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где коэффициенты $a_0, a_1, a_2 \dots$ подлежат определению.

В силу симметрии системы относительно плоскости PP эйконал не должен меняться при взаимной замене в (1) y_1 и

y_2 . Это условие в свою очередь требует равенства коэффициентов для "симметричных" слагаемых ряда, т. е. $a_1 = a_3$, $a_4 = a_8$, $a_5 = a_7$, $a_9 = a_{15}$ и т. д. Сравнивая (1) с выражением для эйконала, полученным методом лучевых матриц, нетрудно также заключить, что a_0 — длина пути луча, направленного вдоль оси, а коэффициенты $a_{1,3} = A/2B$, $a_2 = -1/B$, где A и B — элементы лучевой матрицы для одного прохода резонатора. Остальные коэффициенты в методе лучевых матриц считаются равными нулю.

В предлагаемом подходе коэффициенты эйконала находятся поэтапно. Сначала для $y_1 = 0$ и лучевого вектора, направленного вдоль оси резонатора (в этом случае луч придет на конечное зеркало в точку с координатой $y_2 = 0$), по формулам Федера вычисляется коэффициент $a_0 = \mathcal{F}(0, 0)$. Затем по внеосевым лучам определяются y_2 и $\mathcal{F}(0, y_2)$, по которым методом наименьших квадратов находится коэффициент a_3 (а значит, и a_1). Коэффициент a_2 находится аналогично, но для $y_1 \neq 0$. После этого следует "прозондировать" резонатор несколькими лучами с другими исходными координатами и другими направляющими векторами и, используя найденные при этом $\mathcal{F}(y_1, y_2)$, стандартными методами [9] оценить погрешность аппроксимации. Если эта погрешность велика, то, используя уже известные значения $a_0 - a_3$, необходимо повторить процедуру для нахождения коэффициентов $a_4 - a_8$ и т. д.

Коэффициенты ряда (1) $a_0 - a_8$, рассчитанные предлагаемым методом для лазера [3,5] с $h = 10$ мм, $L = 1200$ мм, $R = 3600$ мм и $d_{90} = 80$ мм, имеют следующие значения: $a_0 = 2480$ мм, $a_{1,3} = -3.2 \cdot 10^{-3}$ мм⁻¹, $a_2 = -7.8 \cdot 10^{-3}$ мм⁻¹, $a_{4,8} = 1.3 \cdot 10^{-3}$ мм⁻³, $a_{5,7} = 5.26 \cdot 10^{-3}$ мм⁻³, $a_6 = 7.9 \cdot 10^{-3}$ мм⁻³. Расчет показывает, что слагаемыми ряда с коэффициентами $a_9 - a_{15}$ при этом можно пренебречь, так как их величина $\sim 10^{-9} - 10^{-12}$ мм⁻⁵. Необходимо отметить, что эксперименты в [3] выполнялись для $R = 6000$ мм, когда действие аббераций мало и коэффициенты $a_4 - a_8$ близки к нулю.

Для оценки влияния абберационных коэффициентов $a_4 - a_8$ на структуру M -моды эйконал (1) использовался при решении интегрального уравнения

$$U(y_2) = G \int_{-h/2}^{h/2} U(y_1) \exp[ik\mathcal{F}(y_1, y_2)] dy_1, \quad (2)$$

где $U(y_{1,2}) = A_{(y_{1,2})} \cdot \exp[i\Phi(y_{1,2})]$ — поле на зеркалах резонатора вдоль y -координат, $A_{(y_{1,2})}$ — амплитудное, а $\Phi(y_{1,2})$ —

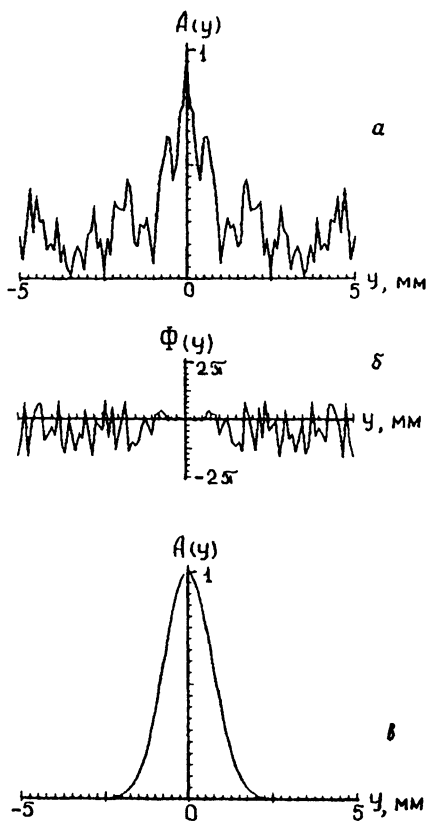


Рис. 2.

фазовое распределения, k — волновое число, $1/6$ — собственное значение.

Уравнение (2) решалось итерационным методом. Для начального распределения поля в виде плоской волны его решение с указанными значениями коэффициентов достигается приблизительно за 30 итераций. Амплитудно-фазовое распределение поля на зеркале для этого случая показано на рис. 2, а-б. Для сравнения на рис. 2, в изображен профиль гауссовой моды, рассчитанной в [10] методом лучевых матриц при указанных выше параметрах резонатора.

Представленные зависимости достаточно наглядно характеризуют действие aberrаций на модовую структуру. Поле на зеркалах сильно изрезано, а рассчитанные с помощью (2) по интенсивности за один проход очень велики $\sim 93\%$. В то же время гауссов пучок для этого случая достаточно узкий и, судя по рис. 2, в, не диафрагмируется краями апертуры. Обычно считают, что волновой фронт гауссовых

пучков слабосферический. Поэтому, если при указанных параметрах резонатора руководствоваться данными, полученными методом лучевых матриц, то погрешность такого расчета оказывается весьма существенной.

Список литературы

- [1] *Горячев С.Б., Короленко П.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 7. С. 429-433.*
- [2] *Васильев А.В., Короленко П.В., Шульга А.Г. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 22. С. 91-94.*
- [3] *Воронов В.И., Большаков С.С., Ляпугин А.В. и др. // ПТЭ. 1993. № 3. С. 162-167.*
- [4] *Короленко П.В., Федотов Н.Н., Шарков В.Ф. // Квант. электрон. 1995. Т. 22. № 6. С. 562-566.*
- [5] *Воронов В.И. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 7. С. 98-107.*
- [6] *Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 264 с.*
- [7] *Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Справочное пособие. Киев.: Наук. думка, 1986. 543 с.*
- [8] *Feder D.P. // JOSA. 1951. V. 41. N 9. P. 630-641.*
- [9] *Батгалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.*
- [10] *Воронов В.И. // Вестн. Казанского гос. техн. ун-та. 1996. № 1. С. 18-23.*

Поступило в Редакцию
14 февраля 1996 г.