

07;12

Измерение распределения интенсивности в лазерном пучке методом оптической томографии

© Ф.В. Булыгин, И.В. Горяинова, А.А. Ковалев, К.Д. Марамзин

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
119361 Москва, Россия
e-mail: bulygina@vniiofi.ru

(Поступило в Редакцию 11 октября 2006 г.)

Предложен метод получения распределения интенсивности в сечении лазерного пучка методом оптической томографии. Получение томографической проекции сечения пучка осуществляется с помощью оптического световода, обладающего высокой лучевой стойкостью, что позволяет применять данный метод для исследования излучения лазеров высокой мощности. Результаты томографической реконструкции сечения пучка по экспериментальным проекциям сравниваются с результатами восстановления по модельным проекциям.

PACS: 42.60.Lh

Введение

При работе с лазерными пучками часто требуется информация о распределении интенсивности в их поперечном сечении. В частности, это необходимо для исследования структуры поперечных мод излучения лазера. В ряде случаев желательно измерять это распределение в поперечном сечении относительно мощного лазерного пучка, практически не ослабляя или слабо искажая сам пучок. Попытки решить эту проблему тем или иным способом предпринимаются вплоть до настоящего времени [1–5].

Особый интерес представляют такие измерения при работе с мощными технологическими лазерами, когда невозможно поместить на пути лазерного луча какой-либо регистратор или ответвитель, поскольку это приводит к его быстрому разрушению под воздействием высокоинтенсивного лазерного излучения. Одним из методов решения данной проблемы является введение в лазерный пучок на короткое время объектов, обладающих высокой лучевой стойкостью и играющих роль ответвителей лазерного излучения [6,7]. Так, в работе [6] было предложено быстро перемещать перпендикулярно оси пучка тонкую тугоплавкую проволоку – спицу, закрепленную на вращающемся диске, и по зеркальному отражению от нее с помощью пироэлектрического детектора измерять мощность излучения в локальных точках лазерного пятна.

В настоящей работе используется та же идея о кратковременном и локальном вводе в пучок элемента измерительной системы. В то же время предлагаемый метод является интегральным и представляет собой еще одну реализацию метода оптической томографии.

Метод измерений

В предлагаемом методе исследуемый лазерный пучок сканируется оптическим световодом — тонкой светопроводящей палочкой, изготовленной из материала, обладающего высокой лучевой стойкостью, например, стекла,

кварца или лейкосапфира. При рассеянии излучения на шероховатостях поверхности световода часть излучения рассеивается внутрь него и „запирается“ вследствие полного внутреннего отражения. Предполагается, что коэффициент такого рассеяния α одинаков по всей длине палочки, вследствие этого мощность излучения, высвечивающегося с торца световода, пропорциональна мощности излучения, падающего на его поверхность.

Нетрудно показать, что эта величина пропорциональна интегралу Радона от распределения интенсивности по сечению пучка, взятому по линии L , проходящей через ось световода

$$P(L) = \alpha \int_L f(x, y) ds. \quad (1)$$

Здесь $P(L)$ — мощность излучения, рассеянного поверхностью световода и „запертого“ в нем; x и y — ортогональные координаты в плоскости, перпендикулярной оси лазерного пучка, ось x горизонтальна; $f(x, y)$ — распределение интенсивности излучения; ds — приращение длины вдоль прямой L .

Зависимость величины $P(L)$ от положения световода представляет собой одномерную томографическую проекцию от распределения интенсивности по сечению пучка. Получив набор таких проекций при разных углах направления движения световода сквозь пучок, можно осуществить томографическую реконструкцию распределения интенсивности в сечении лазерного пучка.

В качестве световода использовалась стеклянная палочка диаметром 2 и длиной 150 мм. Для проверки высказанного предположения о постоянстве коэффициента α были проведены исследования оптических свойств световода. Один из торцов световода имел матовую поверхность. Излучение, выходящее из этого торца, регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). На поверхность световода направлялось излучение гелий-нейлонового лазера, сформированное узкой щелевой диафрагмой в виде „светового

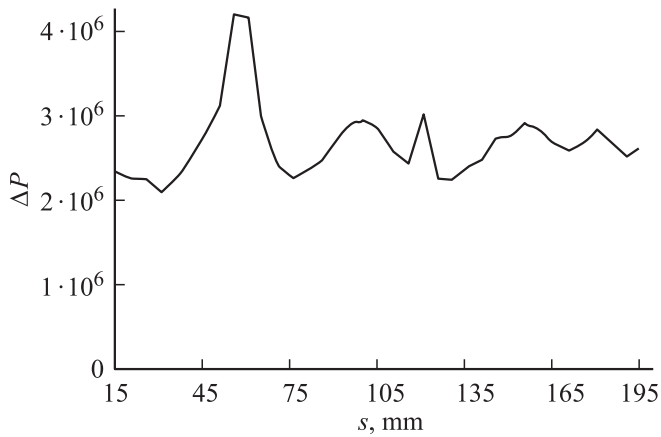


Рис. 1. Зависимость относительной мощности ΔP , излучаемой с торца волновода, от координаты центра лазерного пучка.

ножа“. В процессе эксперимента световой нож перемещался вдоль световода, при этом регистрировалась зависимость тока ФЭУ от положения светового ножа. В ходе данного эксперимента исследовалась зависимость локального коэффициента преобразования используемого стеклянного световода в зависимости от положения центра узкого лазерного пучка относительно торца волновода. На рис. 1 представлены результаты измерений. По оси абсцисс s отложена линейная координата вдоль оси световода, отсчитываемая от торца. По оси ординат $-\Delta P$, относительная мощность, излучаемая с торца волновода, пропорциональная току ФЭУ.

Из полученных результатов следует, что при позиционировании лазерного пучка на расстоянии более 75 мм от торца световода отклонение значений тока ФЭУ, пропорционального мощности излучения, выходящего с торца, не превышало 12% относительно среднего значения. Именно эта область поверхности световода использовалась для томографических измерений распределения энергии в сечении лазерного пучка. Полученную величину отклонения тока ФЭУ от среднего значения можно принять в качестве амплитудной погрешности проекционных данных, что считается вполне приемлемым в оптической малоракурсной томографии [8]. Таким образом, было подтверждено предположение о том, что интенсивность излучения, выходящего из торца использованного световода, пересекающего лазерный пучок, пропорциональна интегралу Радона вдоль световода от распределения интенсивности в исследуемом пучке.

Получение томографических проекций

Для получения проекций сечения пучка мощного технологического лазера была собрана установка, представленная на рис. 2.

Исследуемый лазерный пучок (1) проходил через круглое отверстие в корпусе установки (6). В области отверстия находился зондирующий световод (2), жестко закрепленный в связке с ФЭУ (3). Световод и ФЭУ были

закреплены на системе с шаговыми двигателями, обеспечивающими поступательное (4) и вращательное (5) перемещения зондирующего световода. Сигнал от ФЭУ оцифровывался и поступал в ПЭВМ (7), которая одновременно управляла шаговыми двигателями.

В качестве исследуемого пучка использовался расширенный пучок гелий-неонового лазера, пропущенный через непрозрачный транспарант с двумя отверстиями, так, чтобы имитировать пучок с несимметричной по радиусу пучка модовой структурой (типа TEM_{10}). Трехмерное изображение сечения пучка представлено на рис. 3, а.

В ходе эксперимента путем поворота зондирующего световода в плоскости, перпендикулярной оси исследуемого пучка, было получено 6 проекций сечения пучка под углами φ соответственно 0, 30, 60, 90, 120 и 150 градусов, φ — угол между осью x и нормалью к оси световода в плоскости (x, y) . При получении каждой проекции было проведено 17 измерений мощности излучения на выходе из световода. При этом зондирующий световод с помощью шагового двигателя поступательно перемещался перпендикулярно исследуемому пучку с шагом 2 мм. Каждое полученное значение мощности приписывалось координате, соответствующей оси световода. Промежуточные значения были получены путем кубической интерполяции по экспериментальным точкам.

Реконструкция распределения интенсивности

Обработка экспериментальных результатов и томографическое восстановление изображения объекта проводилось при помощи разработанного во ВНИИОФИ программного пакета „Томо“. Пакет предназначен для решения двумерной томографической задачи восстановления функции двух координат по одномерным томографическим проекциям. В основе программы лежат метод фурье-синтеза и итерационный алгоритм Гершберга [8], что, в принципе, позволяет использовать эту программу при ограниченном наборе данных.

Для определения погрешностей реконструкции, обусловленных конечностью набора проекционных данных, было проведено математическое моделирование, в ходе

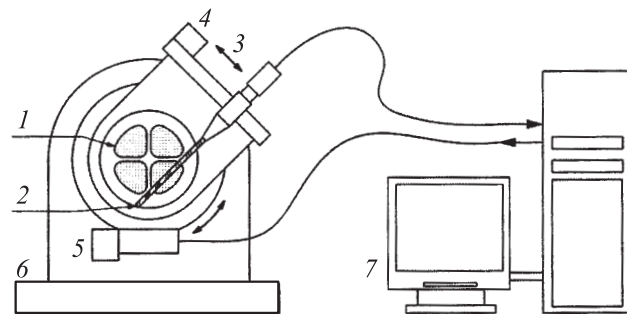


Рис. 2. Схема установки для получения томографических проекций сечения пучка мощного лазера.

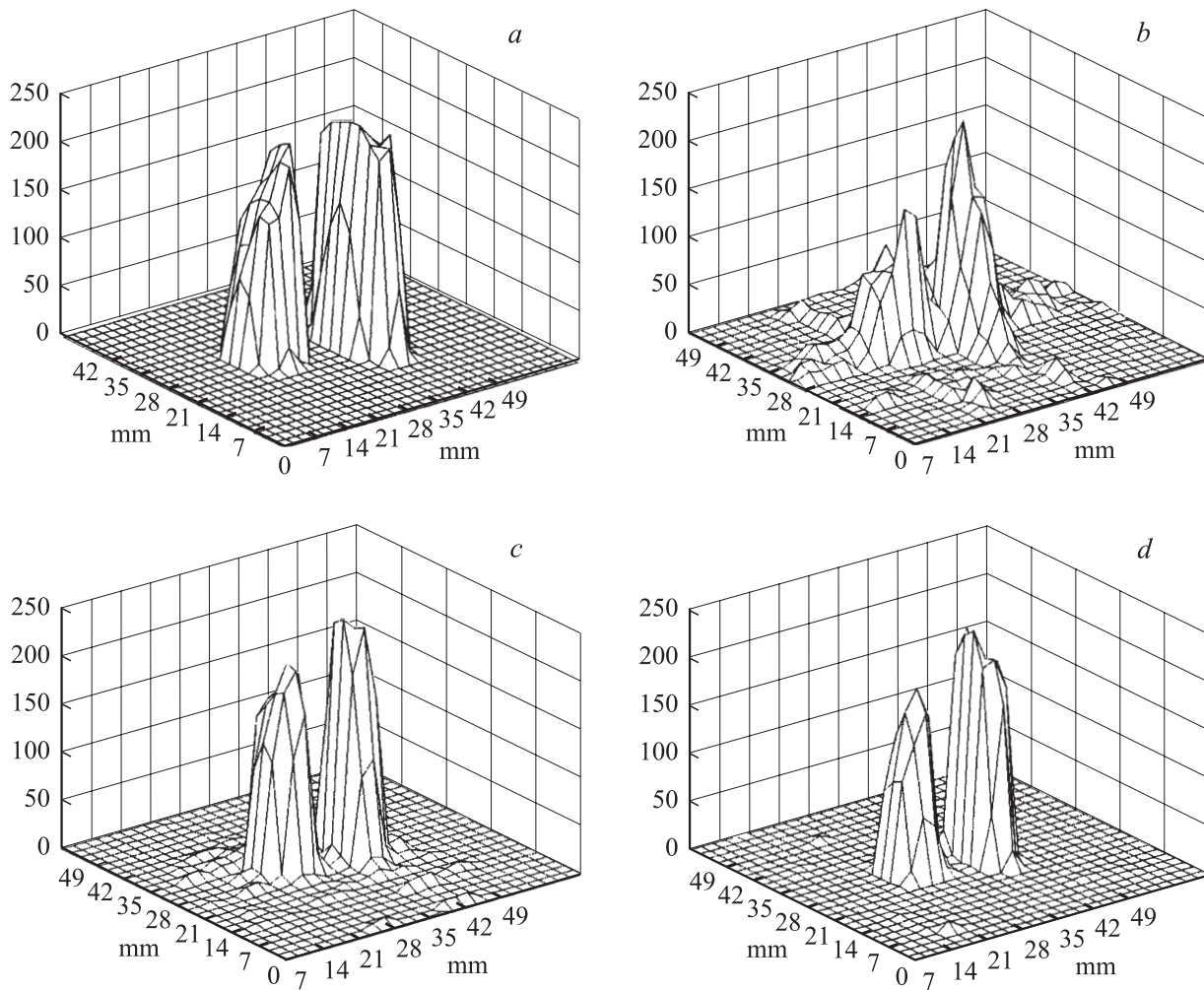


Рис. 3. Профиль интенсивности в поперечном сечении пучка: *a* — изображение, полученное цифровой камерой с матированной поверхности стекла; *b* — реконструированный по экспериментальным измерениям, 6 проекций; *c* — реконструированный по модельным измерениям, 6 проекций; *d* — реконструированный по модельным измерениям, 18 проекций.

которого проводилась томографическая реконструкция распределения интенсивности по одномерным модельным проекциям. Получение модельных проекций проводилось при помощи численного преобразования Радона от цифрового массива, описывающего изображение сечения пучка (рис. 3, *a*).

Поскольку для регистрации изображения распределения интенсивности в поперечном сечении пучка (рис. 3, *a*) использовалась камера ПЗС (пространственно-зарядовой связи), исходная функция $f(x, y)$ представляет собой дискретно заданную функцию $f(i, j)$. Для вычисления преобразования Радона от такой функции ее необходимо интерполировать. В использованном алгоритме реализована интерполяция прямоугольной функцией, которая обеспечивает интерполяцию отсчетов многочленом нулевого порядка.

Реконструкция проводилась с помощью пакета программ „Томо“ для наборов модельных проекций. Первый набор состоял из 6 проекций, полученных под углами от 0 до 150 градусов с интервалом в 30 градусов, и

соответствовал постановке реального эксперимента со световодом. Второй набор состоял из 18 проекций, полученных под углами от 0 до 170 градусов с интервалом в 10 градусов. Результаты восстановления по модельным проекциям представлены на рис. 3, *c, d*.

На рис. 3, *b* представлены результаты томографической реконструкции изображения сечения пучка по 6 экспериментальным проекциям.

Из сравнения реконструированного (рис. 3, *a*) и реального изображений сечения пучка (рис. 3, *b*) следует, что восстановленное изображение отражает основные характерные особенности распределения интенсивности в сечении пучка. Результаты реконструкции позволяют однозначно определить модовую структуру пучка и соотношение интенсивности мод.

Погрешность определения интенсивности составляет 23, а величина определения координат оптических центров тяжести мод — 10%. Однако полученная погрешность велика для детального исследования распределения интенсивности внутри моды.

Сопоставление результатов реконструкции по реальным (рис. 3, *b*) и модельным (рис. 3, *c*) проекциям показало, что первое имеет большее отличие от реального распределения интенсивности в пучке по сравнению с результатами моделирования. Это говорит о значительном влиянии погрешностей экспериментальных проекций, вызванных неточностью определения координат начала проекции, конечной толщиной палочки и пространственной неравномерностью коэффициента рассеяния ее поверхности.

Следует отметить, что на восстановленных изображениях присутствуют артефакты в виде „полос засветки“. Причем, как следует из сравнения рис. 3, *c* и 3 *a*, при большем числе используемых проекций эти полосы практически исчезают. Само же появление таких полос связано с некоторыми недостатками использованного алгоритма восстановления изображения, проявляющимися при использовании ограниченного набора экспериментальных данных.

Заключение

Полученные выше результаты демонстрируют возможность практической реализации предложенного метода. Для этого требуется существенная доработка как измерительного блока, так и программы томографического восстановления изображения. Представляется, что после соответствующей модернизации томографический метод может составить конкуренцию другим известным методам измерения распределения интенсивности в пучках мощных технологических лазеров непрерывного действия.

Список литературы

- [1] Кузьмичев В.М., Похилько С.Н. // Измерительная техника. 2000. № 3. С. 39.
- [2] Соловьев А.П., Зорюкина О.В., Перченко М.И. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 19. С. 72.
- [3] Арутюнян С.Г., Васинюк И.Е., Добровольский Н.М., Малиян М.Г., Оганесян В.А., Синенко И.Г. // Мат. конф. по лазерной физике. 2000. Ереван. С. 81.
- [4] Бондарь И.И., Суран В.В., Бондарь Д.И. // Опт. и спектр. 2004. Т. 96. № 4. С. 655.
- [5] Иванов В.С., Котюк А.Ф., Либерман А.А., Овсик Я., Улановский М.В. Фотометрия и радиометрия оптического излучения. Кн. 2. Энергетическая лазерометрия. М.: Полиграфсервис, 2000. 212 с.
- [6] Lim G.C., Steen W.M. // Optics and Laser Technology. 1982. Vol. 14. N 3. P. 149.
- [7] Скрипченко А.И., Сурков А.В. // Сварочное производство. 1984. № 3. С. 36.
- [8] Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.