

УДК 681.7.066

Д. Н. Синявин, инженер-исследователь
 С. В. Тютин, начальник группы
 Д. А. Чапарин, инженер-исследователь 2-й категории
 Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
 экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)
 Т. Ю. Пономарева, студентка
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
 В. В. Бесогонов, кандидат технических наук, доцент
 Институт механики УрО РАН
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С БОЛЬШИМ ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

В работе приведен пример измерительной системы, использующей две длиннофокусные линзы и формирующей пучок высокой интенсивности при фокусировании семи пучков, согласованных по фазе.

Ключевые слова: фокусирование лазерного излучения, длиннофокусные линзы.

В работах по исследованию управляемого термоядерного синтеза одним из перспективных направлений считается лазерный термоядерный синтез [1–4]. В основе этих работ используется принцип инерционного сжатия сферической мишени при воздействии на ее поверхность мощного импульсного пучка лазерного излучения. Равномерность лазерного воздействия на поверхность мишени обеспечивают за счет большого количества лазерных пучков, равномерно распределенных по поверхности. Плотность мощности на мишени должна быть $\sim 10^{14}$ Вт/см². Расстояние, на которое должна осуществляться передача энергии лазера, обычно составляет 30–50 м. Большие значения плотности мощности возможно получить либо последовательным усилением пучка, либо используя способ направления в одну точку нескольких лазерных пучков с одной длиной волны и одинаковым значением фазы излучения. Фокусирование излучения с большим значением плотности мощности необходимо контролировать по качественным и количественным характеристикам.

В работе рассматривается вопрос использования в лабораторных условиях длиннофокусных линз таким образом, чтобы в дальней зоне иметь возможность размещения системы контроля размеров падающего пучка и его расходимости. Для проведения эксперимента выбрана семиканальная система лазерного излучения с активным стохастическим параллельным градиентным алгоритмом согласования фазы излучения в каждом канале. Рассматривается измерительная система (рис. 1), состоящая из CCD-камеры 1, клина 2, двухлинзовой системы 3 и фотодиода 4, помещенного после диафрагмы.

Суммарное излучение усилительных каналов фокусируется двухлинзовой системой на диафрагму. Клин 2 ($R = 4\%$) отводит часть излучения на CCD-матрицу камеры GenTecBeamageFocusII для визуализации процесса. Пройдя через диафрагму основная часть излучения регистрируется фотодиодом компании «Thorlabs» с фоточувствительным элементом на InGaAs. Фотодиод 4 и камера 1 располагаются в фокальной плоскости двухлинзовой системы.

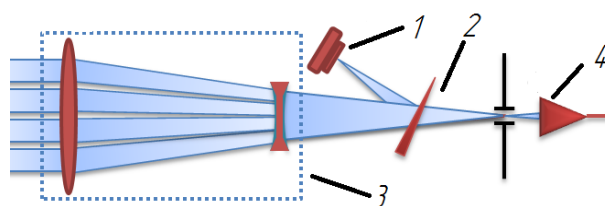


Рис. 1. Измерительная система: 1 – CCD камера; 2 – клин; 3 – двухлинзовая система; 4 – фотодиод

Ожидаемое (расчетное) изображение ближней зоны семи лазерных пучков на выходе линз показано на рис. 2. Размер общей апертуры семи пучков равен 104 мм. Дифракционная расходимость центрального пика в ближней зоне при полном совпадении фаз лазерных пучков определяется размером их общей апертуры [5]:

$$\theta_{\text{диф}} \sim 2.44\lambda / D = 24,5 \cdot 10^{-6} \text{ рад} = 0,0245 \text{ мрад},$$

где D – размер общей апертуры в ближней зоне (рис. 2); λ – длина волны лазерного излучения.

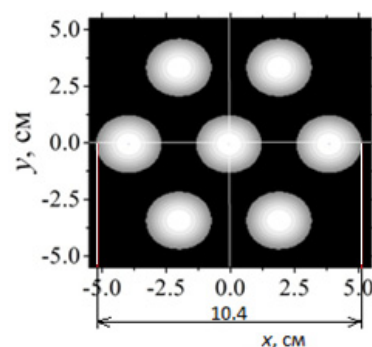


Рис. 2. Ожидаемое изображение ближней зоны семи лазерных пучков на выходе линз

Схема и исходные данные для выполнения расчета двухлинзовой системы фокусировки представлены на рис. 3 и в таблице.

Расчет эквивалентного фокусного расстояния проведен в следующей последовательности [6–8].

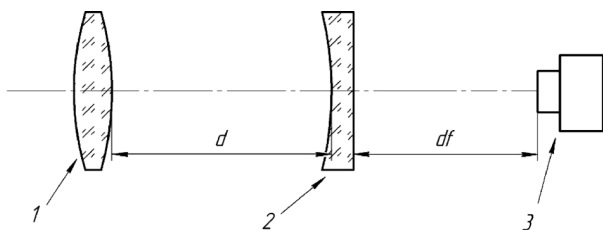


Рис. 3. Схема двухлинзовой системы: 1, 2 – линзы; 3 – диафрагма с фотоприемником

Начальные данные для расчета оптической схемы

Параметр	Значение
Длина волны излучения λ , мкм	1,064
Показатель преломления линз 1 и 2 (стекло К8), на длине волны $\lambda=1,064$ мкм	1,5062
Радиус сферической поверхности линзы 1, мм	1750
Радиус сферической поверхности линзы 2, мм	-120,23
Коэффициент Френелевского пропускания от одной грани, %	4

Определено фокусное расстояние первой линзы, мм:

$$f_1 = r_1 / (n - 1) = 3457,13.$$

Фокусное расстояние второй линзы, мм:

$$f_2 = r_2 / (n - 1) = -237,52,$$

где r_1, r_2 – радиус кривизны первой и второй линз, мм; n – показатель преломления стекла К8.

Задавшись эквивалентным фокусным расстоянием 45000 мм, получаем размер центрального пучка 1,1 мм, что соответствует требованию исследуемой оптической системы.

Из формулы вычисления эквивалентного фокусного расстояния:

$$f_{\text{экв}} = f_1 \cdot f_2 / (f_1 + f_2 - d),$$

где d – расстояние в миллиметрах между первой и второй линзой (рис. 3), определено d – расстояние между первой и второй линзой, мм:

$$d = f_1 + f_1 - f_1 \cdot f_2 / f = 3237,86.$$

Расстояние от второй линзы до диафрагмы с фотоприемником (рис. 3), мм:

$$df = f_{\text{экв}} \cdot (1 - d/f_1) = 2854,11.$$

Для того чтобы на фотоприемник попадало излучение, заключенное в малом телесном угле в окрестности оптической оси, размер диафрагмы должен быть меньше размера центрального пика, поэтому перед фотодиодом была поставлена диафрагма диаметром 0,8 мм. Угол регистрации излучения, попадающего в фотоприемник, определен по нижеприведенной формуле, мрад:

$$\theta_2 = d_2 / f_{\text{экв}} = 0,017,$$

где d_2 – диаметр диафрагмы.

Выбранный размер диафрагмы и отвечающее этому размеру значение угла соответствует тому, что фотоприемник будет регистрировать излучение, заключенное в малом телесном угле в окрестности оптической оси.

Расходимость лазерного излучения в дальней зоне в эксперименте определялась при помощи CCD-камеры GenTecBeamageFocusII. Распределение интенсивности лазерного пучка на матрице камеры определялось с помощью программы GenTecV7 1H23Y, а расходимость рассчитывалась при помощи следующей формулы [9], мрад:

$$\theta_1 = d_1 / f_{\text{экв}} = 0,028,$$

где d_1 – размер центрального пика в распределении излучения на матрице; $f_{\text{экв}}$ – эквивалентное фокусное расстояние.

Измерительная система была изготовлена, собран стенд и проведены экспериментальные исследования согласования фазы лазерных пучков с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма. Время полного согласования фаз системы составило 3–4 мс, при этом мощность результирующего пучка излучения возросла в семь раз по сравнению с дефазированным.

Проведено сравнение экспериментальных и расчетно-теоретических результатов, и получено хорошее согласие между ними.

Заключение

В ходе проделанной работы определены параметры двухлинзовой системы, позволяющие организовать эквивалентный фокус 45 метров на расстоянии 6 метров. Рассчитана и экспериментально измерена (полученная с помощью данной оптической системы) расходимость семиканального лазерного излучения в дальней зоне. Эквивалентное фокусное расстояние равно 45 м, расстояние между линзами 3,237 м, расходимость 0,028 мрад. Измерительная система была исследована экспериментально и показала свою работоспособность.

Библиографические ссылки

1. Басов Н. Г., Розанов В. Б., Соболевский Н. М. Лазерный термоядерный синтез в энергетике будущего // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. – № 6. – С. 3.
2. Бракнер К., Джорна С. Управляемый лазерный синтез / пер. с англ. – М., 1977.
3. Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой / Ю. В. Афанасьев и др. // Итоги науки и техники. Радиотехника. – 1978. – Т. 17.
4. Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером / Н. Г. Басов и др. // Итоги науки и техники. Радиотехника. – 1982. – Т. 26; ч. 1–2.
5. Ландсберг Г. С. Оптика : учеб. пособие для вузов. – М. : Физматлит, 2003. – 848 с.
6. Бебчук Л. Г., Богачев Ю. В., Закаэнов Н. П. Прикладная оптика : учеб. пособие для приборостроительных специальностей вузов. – М. : Машиностроение, 1988. – 312 с.
7. Закаэнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. Н. Теория оптических систем : учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с.
8. Апенко М. И., Запрягаева Л. А., Свешикова И. С. Задачник по прикладной оптике : учеб. пособие. – М. : Высш. шк., 2003. – 591 с.
9. ГОСТ 26086–84. Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения.

* * *

D. N. Sinyavin, Research engineer, Russian Federal Nuclear Center

S. V. Tyutin, Head of group, Russian Federal Nuclear Center

D. A. Chaparin, Research engineer, Russian Federal Nuclear Center

T. Yu. Ponomareva, Student, Kalashnikov ISTU

V. V. Besogonov, PhD in Engineering, Associate Professor, Institute of Mechanics, UB RAS

Measuring system with large equivalent focal length

This work presents the example of the measuring system, using two long-focal-length lenses and forming high intensity beam at focusing of seven beams coordinated on a phase.

Keywords: focusing of laser radiation, long-focal-length lenses.

Получено: 26.03.15