

А.Г. Александров, А.В. Кудряшов, А.Л. Рукосуев, В.В. Самаркин

Адаптивная оптическая система для коррекции излучения фемтосекундных лазеров

Институт проблем лазерных и информационных технологий, г. Шатура Московской области

Поступила в редакцию 13.05.2003 г.

Представлена замкнутая адаптивная оптическая система на основе деформируемого биморфного зеркала, датчика волнового фронта типа Шака–Гартмана и электронной системы управления. Для коррекции излучения лазера использован алгоритм фазового сопряжения. Применение данной системы на установке титан-сапфирового лазера с мощностью импульсов 10 ТВт позволило увеличить плотность мощности в фокусе параболического зеркала в 50 раз.

В последнее время для научных исследований в мире все активнее применяются лазерные комплексы, обладающие большой энергией в импульсе. Уникальные энергетические характеристики таких лазеров достигаются благодаря сжатию импульса излучения по длительности до фемтосекундного уровня. Однако качество излучения таких лазеров остается крайне низким, что определяется сложными нелинейными взаимодействиями излучения с оптическими элементами лазерной установки [1]. Аберрации волнового фронта не позволяют получить размер фокального пятна на мишени, близкий к дифракционному пределу, что снижает эффективность использования таких лазерных комплексов [1].

Коррекция фазовой структуры излучения с помощью традиционной формирующей оптики позволяет лишь частично решить проблему, так как термодформации оптических элементов лазерной установки с течением времени приводят к непредсказуемым динамическим искажениям волнового фронта. Одним из эффективных путей повышения качества излучения в данной ситуации является использование гибких зеркал, управляемых с помощью адаптивной оптической системы, в основу работы которой положен контроль качества волнового фронта выходного пучка [2].

Традиционная блок-схема адаптивной оптической системы показана на рис. 1. Учитывая особенности лазеров, обладающих большой энергией в импульсе, в качестве корректора волнового фронта целесообразно использовать биморфное адаптивное зеркало [3], которое состоит из подложки с отражающим покрытием и приклеенных к ней двух пьезокерамических дисков. Внутренний пьезодиск со сплошными электродами служит для коррекции общей кривизны поверхности. На внешней поверхности второго диска выполнены электроды в виде частей секторов, которые служат для воспроизведения различных аберраций низших порядков. Такие зеркала позволяют эффективно корректировать аберрации низших порядков с амплитудой до 10–30 мкм с использованием небольшого количества управляющих электродов. Кроме того, данный тип

зеркал обладает высокой лучевой стойкостью; также возможно изготовление охлаждаемого биморфного зеркала [3].

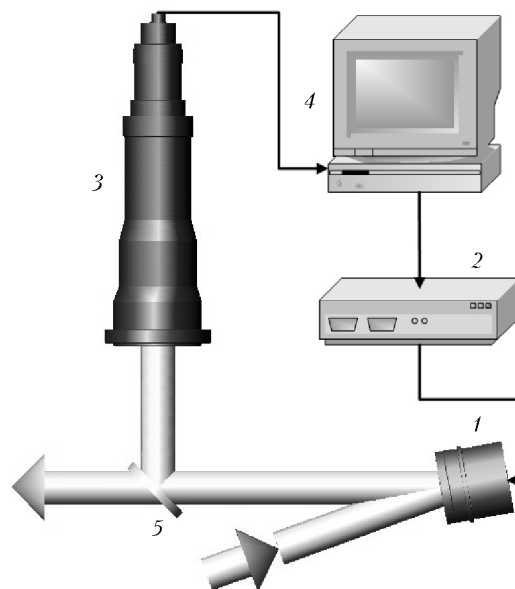


Рис. 1. Блок-схема адаптивной оптической системы: 1 – корректор волнового фронта; 2 – блок управления корректором; 3 – датчик волнового фронта; 4 – компьютер; 5 – светоделительная пластина

В качестве анализатора волнового фронта представляется целесообразным использование датчика типа Шака–Гартмана [4]. Высокая точность, компактность, удобство настройки и юстировки, инвариантность к длине волны, широкий диапазон входной апертуры пучка, устойчивость к вибрациям делают незаменимым данный тип датчика волнового фронта в адаптивных оптических системах. Установка в датчик видеокамеры прогрессивного сканирования со стандартным выходным телевизионным сигналом (типа Watec WAT-103) решает проблему регистрации импульсов длительностью менее длительности полукадра и позволяет исполь-

зовать широкий спектр стандартных устройств ввода видеоизображения в компьютер.

Программное обеспечение компьютера предоставляет возможность выполнять все действия, необходимые для работы оптической системы, — калибровку, юстировку системы, измерение опорного волнового фронта, функций отклика корректора, текущего волнового фронта, вычисление корректирующих напряжений, контроль за работой электронной системы управления, отображение результатов коррекции на экране.

Принцип коррекции волнового фронта состоит в изменении профиля гибкого зеркала таким образом, чтобы фазовое распределение выходного пучка соответствовало заданному распределению. Для анализа фазового распределения на выходе системы часть энергии отраженного от корректирующего зеркала луча с помощью светоделительной пластины (рис. 1) ответвляется на датчик волнового фронта. Проанализировав текущее распределение фазы на выходе системы, программа вычисляет набор напряжений, которые необходимо подать на электроды гибкого зеркала для осуществления коррекции. Подача напряжений осуществляется с помощью электронной системы управления корректором. Для обеспечения высокой производительности и надежности передачи данных связь между компьютером и блоком управления осуществляется с использованием интерфейса стандарта USB.

Поскольку основной задачей коррекции излучения фемтосекундных лазеров является получение хорошего распределения интенсивности в дальней зоне, в качестве опорного обычно выбирают плоский волновой фронт. Процесс коррекции включает в себя три основных этапа — запись опорного волнового фронта, измерение функций отклика и непосредственно этап компенсации искажений. Запись опорного волнового фронта выполняется при помощи источника излучения, который обладает требуемым фазовым распределением, длиной волны, приближенной к длине волны корректируемого излучения, и размерами апертуры не менее диаметра корректируемого пучка. Измерение функций отклика гибкого зеркала организовано непосредственно в корректируемом луче. Это позволяет упростить конструкцию системы и обеспечивает улучшение точности коррекции за счет неизменности положения гибкого зеркала относительно луча. Для измерений функций отклика фиксируются два волновых фронта: один без напряжений на электродах зеркала, другой — при подаче напряжения на один из электродов. Разность волновых фронтов и является функцией отклика заданного электрода зеркала. Указанный процесс повторяется последовательно для всего набора электродов. Результаты измерений запоминаются в памяти компьютера или записываются в файл специального формата.

Коррекция импульсов фемтосекундного лазера возможна благодаря сильной корреляции между соседними импульсами. Фактически проводится измерение одного импульса, а корректируется фазовое распределение следующего импульса. Этот

же эффект позволяет выполнять измерения функций отклика непосредственно при помощи корректируемого луча лазера. Ввиду того что частота импульсов лазера и частота кадровой развертки датчика волнового фронта различны, датчик может регистрировать серию пустых кадров. Поскольку синхронизировать работу лазера и датчика волнового фронта на аппаратном уровне крайне сложно, для отбраковки пустых кадров разработана специальная программа, позволяющая использовать для работы только те кадры, которые имеют изображение лазерного пучка.

Впервые адаптивная оптическая система была установлена и испытана на лазерном комплексе «Атлас» в г. Гаршинг, Германия [5]. Лазерная установка имеет следующие характеристики: длительность импульса — 150 фс, частота повторения импульсов — 10 Гц, энергия — до 1,5 Дж. Применение адаптивной системы позволило динамически корректировать волновой фронт выходного излучения с частотой около 2 Гц. В результате коррекции удалось увеличить плотность мощности в дальней зоне с 10^{18} до $5 \cdot 10^{19}$ Вт/см², а фактор Штреля — с менее 0,1 до 0,8, тем самым получить в фокусе параболического зеркала пятно, близкое к дифракционному пределу [5] (рис. 2).

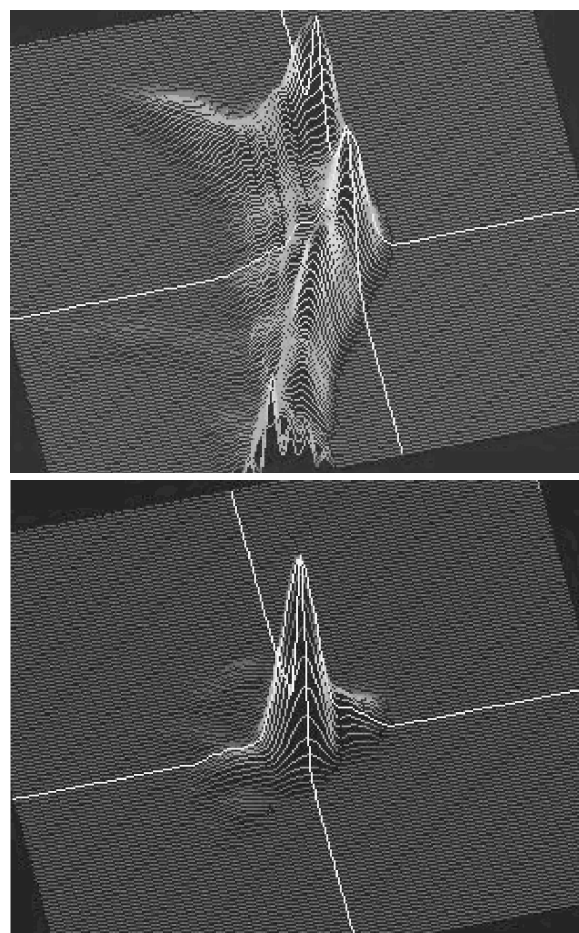


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне до и после коррекции

Результаты проведенных исследований показывают высокую эффективность применения адаптивной оптической системы для коррекции излучения современных мощных фемтосекундных лазеров.

1. *Mourou G., Barty Ch.P.J., Perry M.D.* // Phys. Today. 1998. P. 22–28.

2. *Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И.* Управляемые оптические системы. М.: Наука, 1988. 272 с.
3. *Kudryashov V., Shmalhausen V.I.* // Opt. Eng. 1996. V. 35. N 11. P. 3064–3073.
4. *Yoon G.Yo., Jitsuno T., Nakatsuka M., Nakai S.* // Appl. Optics. 1996. V. 35. N 1. P. 188–192.
5. *Baumhacker H., Pretzler G., Witte K.J., Hegelich M., Kaluza M., Karsch S., Kudryashov A., Samarkin V., and Roukossouev A.* // Opt. Lett. 2002. V. 27. N 17. P. 1570–1572.

A.G. Aleksandrov, A.V. Kudryashov, A.L. Rukosuev, V.V. Samarkin. **Adaptive optical system for correction of femtosecond laser radiation.**

A closed-loop adaptive optical system based on a deformable bimorph mirror, Shack-Hartmann wavefront sensor, and electronic control system is presented. A phase conjugation algorithm is used for correction of the laser beam. The use of the system in the titanium-sapphire laser with 10 TW pulses allowed the power density at the focus of a parabolic mirror to be increased 50 times.