

**АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО  
ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА\*\*****А. Г. Александров, В. Е. Завалова, А. В. Кудряшов, А. Л. Рукосуев, В. В. Самаркин\***

УДК 535.345.6

ООО “АДОПТ”, Россия,

115407, Москва, ул. Судостроительная, 18, корп. 5; e-mail: samarkin@nightn.ru

(Поступила 27 декабря 2004)

Разработана и исследована адаптивная оптическая система с замкнутой обратной связью, основанная на алгоритме фазового сопряжения, включающая в себя деформируемое биморфное зеркало и датчик волнового фронта шак-гартмановского типа. Эта система использована для повышения качества фокусировки излучения в лазере со сверхкороткими импульсами, созданном для фундаментальных исследований в области физики высоких энергий. В  $Ti:Al_2O_3$ -лазере с 10-ТВт импульсами излучения получена плотность мощности  $4 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> на плоскости фокусировки.

**Ключевые слова:** адаптивная оптическая система, биморфное зеркало, датчик волнового фронта, коррекция лазерного излучения.

*An adaptive optical closed-loop feedback system based on the phase conjugate algorithm has been developed and investigated. It consists of a deformable bimorph mirror and Shack-Hartmann type wavefront sensor. Such a system has been used for the improvement of the focus quality in a ultrashort pulse laser intended for fundamental research in the field of high energy physics. A power density of  $4 \cdot 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> has been achieved in the focal plane for a  $Ti:Al_2O_3$ -laser with a pulse power of 10 TW.*

**Keywords:** adaptive optical system, bimorph mirror, wavefront sensor, laser beam correction.

**Введение.** В последнее время наблюдается быстрый прогресс в разработке и совершенствовании фемтосекундных лазерных систем на основе активного элемента из сапфира, легированного титаном ( $Al_2O_3:Ti$ ), далее  $Ti:Sa$ -лазеры.  $Ti:Sa$ -Лазеры обладают высокой энергией в импульсе и минимальной длительностью импульсов. Отличительная особенность этих лазеров — возможность перестройки рабочей длины волны излучения от 650 до 1000 нм [1]. Такие параметры излучения позволяют получить интенсивность светового поля больше характерной “релятивистской” интенсивности  $I_{\text{рел}} \approx 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> [2]. Взаимодействие такого сверхсильного светового поля с веществом может приводить к генерации многих хорошо сфазированных интенсивных гармоник, а следовательно, к генерации ступков электромагнитного поля длительностью порядка  $10^{-16}$ — $10^{-18}$  с. Мощные фемтосекундные  $Ti:Sa$ -лазеры используются также для получения направленных пучков жесткого рентгеновского и  $\gamma$ -излучения при взаимодействии с пучками электронов. Например,  $Ti:Sa$ -лазерный комплекс АТЛАС (Max Planck Institute of Quantum Optics, Германия) был создан для исследования распространения импульсов сверхвысокой интенсивности через плазму низкой плотности, для рентгеновской и УФ спектроскопии горячей плазмы с высокой плотностью излучения гармоник от твердых и газообразных мишеней, ядерных реакций, индуцируемых лазерным излучением и др. [3].

Однако конструктивные особенности таких лазеров не обеспечивают высокого качества выходного излучения, что не позволяет получить на мишени фокальное пятно, близкое к дифракционному пределу. Основным источником искажений является широкоапертурный активный кристалл  $Ti:Al_2O_3$ , имеющий ростовые дефекты и неоднородную термолинзу при накачке.

Один из способов улучшения фокусировки — коррекция волнового фронта излучения методами адаптивной оптики. Хотя основы и принципы адаптивной оптики были заложены еще в 50—70-е гг. прошлого века, разработанные для военных и астрономических целей адаптивные оптические системы [4]

**ADAPTIVE CORRECTION OF RADIATION OF HIGH POWER TITANIUM-SAPPHIRE LASER****A. G. Aleksandrov, V. Ye. Zavalova, A. V. Kudryashov, A. L. Rukosuev, and V. V. Samarkin\*** (ООО “АДОПТ”, 18/5 Судостроительная Стр., Moscow, 115407, Russia; e-mail: samarkin@nightn.ru)

\*\* Доложено на 5-й Международной научно-технической конференции “Квантовая электроника”, 22—25 ноября 2004 г., Минск, Беларусь.

оказались довольно сложными, дорогостоящими, а следовательно, недоступными для широкого применения. Однако на основе развития электронных, оптических и информационных технологий стала возможна разработка новых типов недорогих элементов адаптивной оптики: корректоров, датчиков волнового фронта и электронных систем управления.

В настоящей работе описаны алгоритмы разработанной адаптивной оптической системы, ее составные элементы, а также приведены результаты использования этой системы для повышения качества фокусировки излучения со сверхкороткими импульсами в лазере тераваттного уровня мощности.

**Адаптивная система для коррекции лазерного излучения.** Адаптивная оптическая система состоит из корректора, датчика волнового фронта, электронной системы управления и программного обеспечения. Цель работы системы — получение на выходе из системы волнового фронта, соответствующего требуемому распределению фаз, которое, как правило, является плоским. Часть входящего в систему излучения с помощью светоделительной пластины ответвляется на датчик волнового фронта, данные с которого поступают в компьютер. По специальной программе анализируется волновой фронт и вычисляются напряжения, которые необходимо подавать на электроды корректора. Подача напряжений осуществляется автоматически с помощью электронной системы управления. Рассмотрим составные части замкнутой адаптивной оптической системы.

*Корректор волнового фронта.* Корректор волнового фронта является ключевым элементом любой адаптивной оптической системы и определяет структуру и возможности всей системы. К корректору предъявляются повышенные требования: эффективность воспроизведения аберраций волнового фронта, широкий диапазон деформации поверхности при небольшом количестве управляющих электродов, температурная стабильность поверхности, лучевая стойкость покрытия, простота изготовления, а также низкая стоимость. Корректор на основе биморфного пьезоэлемента, или так называемое биморфное зеркало, наиболее полно удовлетворяет этим требованиям [5]. Биморфное зеркало состоит из подложки с отражающим покрытием и приклеенных к ней двух пьезокерамических дисков (рис. 1). Внутренний пьезодиск со сплошными электродами служит для коррекции общей кривизны поверхности (аберрация, дефокусировка). На поверхности второго диска выполнены электроды в виде секторов, которые служат для воспроизведения аберраций низших порядков, таких, как астигматизм, кома, сферическая аберрация и т. д. На рис. 1 показаны возможные схемы расположения электродов. Количество необходимых электродов и их размер определяются внешними условиями, например характерным видом искажения волнового фронта и пространственным масштабом искажений. Деформация (изгиб) зеркала происходит вследствие обратного пьезоэффекта при наличии электрического поля  $E$  в пьезодиске. Пьезоэффект приводит к продольному растяжению (сжатию) пьезокерамики, которое можно представить как  $\varepsilon = d_{31}E$ , где  $d_{31}$  — пьезоэлектрический модуль. Это растяжение приводит к изгибу отражающей поверхности. Такой тип корректора позволяет осуществлять модальный принцип управления поверхностью и является оптимальным для компенсации крупномасштабных искажений размером более 3—5 мм. Определение оптимального размера электродов через связь флуктуаций фазы и радиуса когерентности Фрида приведено в [6, 7]. В [6] показано, что, во-первых, среднеквадратичное отклонение (СКО) воспроизводимых корректором аберраций от теоретических значений оказалось минимальным, когда первое и второе кольца электродов имели радиусы  $r_1 = 0.5R$  и  $r_2 = 0.9R$  соответственно, где  $R$  — радиус зеркала. Во-вторых, в этом случае СКО составило 0.3 % для дефокусировки, 0.7 % для астигматизма, 5 % для комы и 6 % для сферической аберрации.

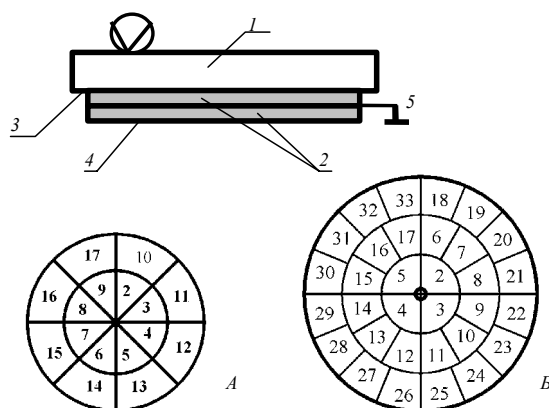


Рис. 1. Устройство биморфного зеркала и схема управляющих электродов для зеркал *A* и *B* (см. табл. 1); *1* — подложка с отражающей поверхностью; *2* — пьезокерамические диски; *3* — электрод для управления кривизной; *4* — электроды для коррекции аберраций низких порядков; *5* — общий электрод

Т а б л и ц а 1. Параметры биморфных зеркал *A* и *B*

Апертура, мм	Активная апертура, мм	Количество электродов	Коэффициент отражения, %	Резонансная частота, кГц	Максимальная деформация, мкм	Деформация одним электродом, мкм
Зеркало <i>A</i>						
30	28	17	99.8	9.1	12	1.8
Зеркало <i>B</i>						
80	70	33	99.8	1.65	30	2.8

Для задач коррекции волнового фронта мощных лазеров со сверхкороткими импульсами излучения нами разработаны и изготовлены два зеркала *A* и *B*, основные характеристики которых приведены в табл. 1. Материалом подложки служило стекло. На поверхности зеркал было нанесено многослойное диэлектрическое покрытие, коэффициент отражения которого составил более 99.8 % в полосе длин волн 780—800 нм. Это покрытие обеспечивает лучевую прочность поверхности не менее 1 Дж/см<sup>2</sup>. Диаметр зеркала *A* равен 30 мм, оно включает два пьезодиска диаметром 30 мм, на которых выполнены 17 управляющих электродов (см. рис. 1). Деформация поверхности зеркала при максимальном напряжении 300 В составила 12 мкм. Частота первого резонанса 9.1 кГц.

Зеркало *B* диаметром 80 мм имело 33 управляющих электрода (рис. 1). Максимальная деформация поверхности 30 мкм, деформация при подаче напряжения на отдельные электроды — 2.8 мкм. Диапазон деформации поверхности значительно превышал длину волны излучения Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-лазера. Это делает перспективным использование зеркала для коррекции излучения вне лазерного резонатора. Частота первого резонанса 1650 Гц.

*Датчик волнового фронта.* Измерение волнового фронта в процессе работы адаптивной системы осуществляется датчиком волнового фронта. После предварительного анализа был разработан датчик волнового фронта шак-гартмановского типа. Он способен работать в белом свете, менее чувствителен к механическим вибрациям и, что наиболее важно для наших задач, способен работать с импульсным излучением фемтосекундного диапазона длительности.

Главные элементы датчика — приемник ПЗС-камеры и линзовый растр. Линзовый растр представляет собой матрицу микролинз, которые разбивают входящий волновой фронт на локальные участки, фокусирующие затем на приемнике. На приемнике формируется изображение, называемое гартманограммой. Для согласования апертуры измеряемого пучка и приемника обычно применяется телескоп. В нашей конструкции в качестве масштабирующего устройства использовалась одна длиннофокусная линза. Для анализа изображения было разработано программное обеспечение [8].

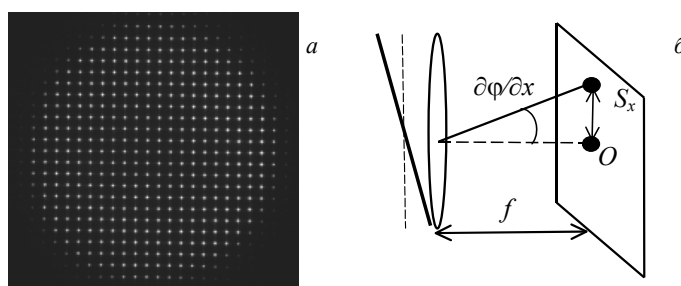


Рис. 2. Типичный вид гартманограммы (*a*) и преломление лучей одиночной микролинзой (*б*): фокальное пятно *O* на локальной области ПЗС-камеры соответствует плоскому волновому фронту (пунктирная линия) на апертуре микролинзы с фокусным расстоянием *f*, *S<sub>x</sub>* — смещение фокального пятна для волнового фронта с локальным наклоном  $\partial\varphi/\partial x$

Принцип действия датчика шак-гартмановского типа основан на измерении локальных наклонов волнового фронта, которые пропорциональны локальным смещениям фокальных пятен. Пример гартманограммы представлен на рис. 2, *a*. На рис. 2, *б* изображена одиночная микролинза растра, фокусирующая падающее излучение на приемном элементе ПЗС-камеры. Координаты центра фокальных пятен ( $x_k, y_k$ ) находились методом центроидов для каждой из локальных областей, на которые разбивается вся поверхность приемника:

$$x_k = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m x_i I_{ij} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m I_{ij} \right)}, \quad y_k = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m y_i I_{ij} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m I_{ij} \right)}, \quad (1)$$

где  $m, n$  — число чувствительных элементов (пикселей) ПЗС-матрицы по осям  $x, y$  в пределах  $k$ -й локальной области;  $I_{ij}$  — интенсивность в пикселе. Локальный наклон волнового фронта  $\varphi$  по координатам  $x$ ,  $y$  можно записать как

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \frac{1}{f} S_x^k, \quad \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \frac{1}{f} S_y^k, \quad k = 1, \dots, NK,$$

где  $f$  — фокусное расстояние микролинзы;  $x_k^0, y_k^0$  — координаты центра  $k$ -го фокального пятна для плоского волнового фронта;  $NK$  — число фокальных пятен на гартманограмме. Таким образом, локальный наклон волнового фронта в  $k$ -й области пропорционален смещению фокального пятна, которое находится экспериментально:

$$S_x^k = x_k^0 - x_k, \quad S_y^k = y_k^0 - y_k. \quad (2)$$

С другой стороны, локальный наклон можно представить в виде разложения по полиномам Цернике (?):

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial x} \quad \text{и} \quad \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial y}, \quad (3)$$

где  $NP$  — число полиномов разложения;  $a_p$  — коэффициенты при полиномах Цернике;  $F_p(x_k, y_k)$  — значение полинома Цернике  $p$ -го порядка в точке  $(x_k, y_k)$ . Коэффициенты при полиномах Цернике показывают величину aberrаций волнового фронта, например дефокусировку, астигматизмы, комы и т. д. Приравнивая правые части (2) и (3), получаем систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов Цернике. В матричной форме система выглядит как  $\mathbf{S} = a d\mathbf{F}$ , где  $\mathbf{S}$  — вектор смещений, отнесенных к фокусному расстоянию  $f$ ;  $a$  — коэффициенты Цернике;  $d\mathbf{F}$  — прямоугольная матрица производных от двухмерных полиномов Цернике, размером  $NP \times 2NK$ . Для решения системы использован метод наименьших квадратов, суть которого заключается в минимизации функционала разности между наклонами волнового фронта, определенными экспериментально по (2), с одной стороны, и представленными по разложению (3), с другой. Метод удобно представить в матричной форме:  $\min \|\mathbf{S} - a d\mathbf{F}\|^2$ . Решением полученной системы уравнений является выражение для нахождения коэффициентов полиномов Цернике:

$$a = (d\mathbf{F}^t d\mathbf{F})^{-1} d\mathbf{F}^t \mathbf{S}, \quad (4)$$

где  $d\mathbf{F}^t$  — транспонированная матрица.

Для представления фазового распределения в виде интерференционной картины, удобной для визуальной оценки величины aberrаций, волновой фронт рассчитывался по найденным коэффициентам Цернике:

$$\varphi(x, y) = \sum_{p=1}^{NP} a_p F_p(x, y), \quad (5)$$

а распределение интенсивности света для каждой точки апертуры — по формуле

$$I(x, y) = 2[1 + \cos(2\pi/\lambda \varphi(x, y))], \quad (6)$$

где  $I(x, y)$  — интенсивность в точке  $(x, y)$  интерференционной картины.

**Алгоритм работы адаптивной системы с замкнутой обратной связью.** Принцип работы адаптивной оптической системы основан на воспроизведении поверхностью зеркала фазового распределения, сопряженного к корректируемому волновому фронту. Управление поверхностью биморфного зеркала осуществляется путем подачи напряжений на электроды. Величина требуемых напряжений рассчитывается по предложенному нами алгоритму [9]. До включения системы предварительно измеряются координаты центров фокальных пятен для плоского волнового фронта и функции отклика электродов зеркала. Число функций отклика зеркала равно количеству электродов. Функция отклика электрода — это результат деформации поверхности зеркала от приложенного единичного напряжения  $u_0$  к данному электроду. Функции отклика записываются в виде матрицы смещений фокальных пятен в направлениях  $x$  и  $y$  для всего набора электродов. Во время работы системы датчик измеряет текущий волновой фронт. Любое искажение волнового фронта, представленное в виде вектора смещений пятен, может быть разложено в ряд по функциям отклика, а коэффициентами разложения и будут напряжения, которые необходимо приложить к электродам зеркала, но с обратным знаком. Математически это записывается в виде

$$S_i = \begin{vmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^{NE} u_j b_j^i, \quad (7)$$

где  $S_i$  ( $\Delta x_i, \Delta y_i$ ) — смещения по осям, или разница координат центров пятен для плоского и измеряемого волновых фронтов,  $i = 1, \dots, NK$ ;  $u_j$  — напряжение на  $j$ -м электроде,  $j = 1, \dots, NE$ ,  $NE$  — число электродов;  $b$  — матрица дискретных значений функций отклика. Элементы матрицы  $b_j^i$  находятся как  $b_{jx}^i = \Delta x_i / u_{0j}$  для направления  $x$  и  $b_{jy}^i = \Delta y_i / u_{0j}$  для направления  $y$ . Для расчета напряжений используется метод наименьших квадратов, который минимизирует функционал разности смещений, измеренных и представленных в виде разложения  $\min \|\mathbf{S} - b\mathbf{u}\|^2$ . В результате решения получаем вектор напряжений  $\mathbf{u} = B\mathbf{S}$ , где  $B = (b^t b)^{-1} b^t$ ,  $b^t$  — транспонированная матрица размером  $2NK \times NE$ .

Критерием эффективности коррекции волнового фронта является достижение минимальных смеще-

ний пятен по отношению к случаю плоского волнового фронта, что определяется точностью измерения волнового фронта. Автоматическое управление напряжениями на электродах осуществляется на основе линейного, пропорционального алгоритма. На  $k$ -м шаге итераций на электроды подается напряжение  $u_k = u_{k-1} + h(u - u_{k-1})$ , где  $k = 1, 2, \dots$  — номер итерации;  $u$  — рассчитанное напряжение на данном электроде. Обычно через 3—4 итерации напряжение на электродах зеркала перестает изменяться. Это означает, что система скомпенсировала внесенные aberrации. Контроль за результатом работы системы осуществляется по наблюдению за скорректированным волновым фронтом, который представляется в виде полиномов Цернике и интерференционной картины, а также максимальной амплитудой волнового фронта и СКО. Адаптивная оптическая система позволяет уменьшить амплитуду aberrаций волнового фронта до 0.1 мкм и СКО = 0.03 мкм.

**Эксперимент и результаты.** Разработанная адаптивная система использована для коррекции излучения и улучшения качества фокусировки в  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазере АТЛАС. Лазер генерировал импульсы с энергией 1.5 Дж и длительностью 130 фс при частоте повторения 10 Гц [3]. Излучение фокусировалось на мишени с помощью параболического зеркала. Качество фокусировки оказалось изначально плохим, так как волновой фронт на выходе из лазера был искаженным. Как показали измерения в ближнем поле, распределение интенсивности изначально очень неравномерное и максимальная плотность энергии достигает  $300 \text{ мДж/см}^2$  (рис. 3, а). Эта величина превышает предельную плотность разрушения дифракционной решетки, используемой для сжатия импульсов. Поэтому энергия импульсов выходного излучения ограничивалась величиной 0.5 Дж, что значительно меньше энергии (1.5 Дж), возможной при максимальной энергии накачки 5 Дж. Выравнивая распределение интенсивности, можно повысить энергию накачки активного кристалла. Для этой цели в оконечном усилителе установлено биморфное зеркало А (см. табл. 1). В результате оптимизации формы поверхности этого зеркала получено более однородное распределение интенсивности (рис. 3, б) с максимальной плотностью энергии, не превышающей  $90 \text{ мДж/см}^2$  [10]. Это позволило увеличить энергию накачки и получить энергию выходных импульсов 1.5 Дж.

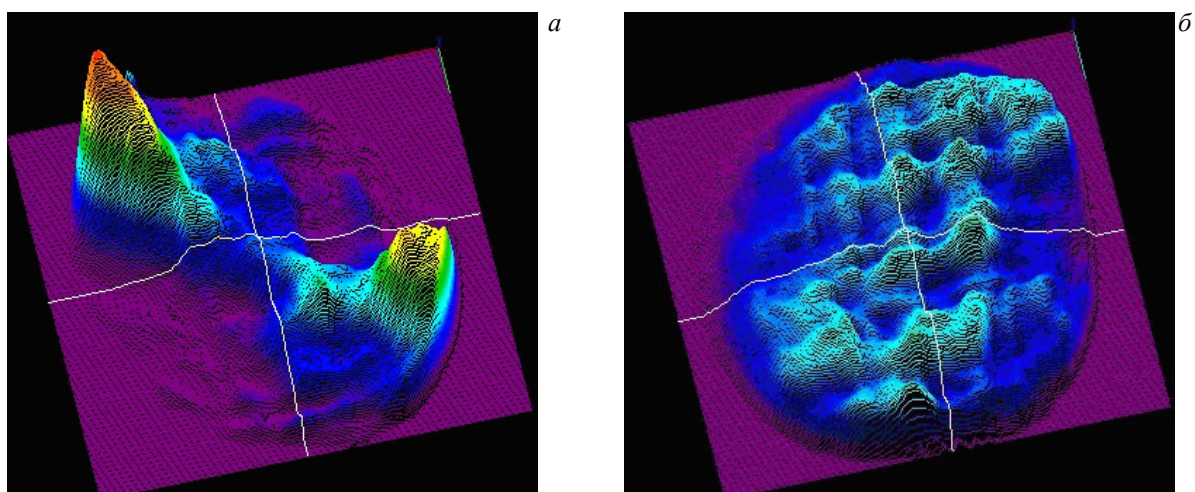


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазера в ближней зоне: а — до коррекции, б — после коррекции биморфным зеркалом А

Для коррекции непосредственно волнового фронта излучения использовалось второе биморфное зеркало Б (см. табл. 1), которое управлялось в автоматическом режиме с помощью разработанной адаптивной системы. Качество коррекции волнового фронта оценивалось по распределению интенсивности излучения в фокусе параболического зеркала с помощью анализатора пучка. На рис. 4 представлены измеренные распределения интенсивности в фокусе до коррекции и после нее. Рис. 4, а соответствует излучению лазера с энергией в импульсе 1.3 Дж, диаметр фокального пятна  $\approx 25 \text{ мкм}$ , фактор Штреля меньше 0.1. Плотность мощности в фокусе  $6 \cdot 10^{17} \text{ Вт/см}^2$ . Включение адаптивной системы значительно улучшило качество фокусировки (рис. 4, б). При той же энергии в импульсе 1.3 Дж в круге дифракционно-ограниченного размера ( $d_0 = 5.5 \text{ мкм}$ ) концентрировалось уже 65 % энергии излучения и фактор Штреля достигал 0.8. Плотность мощности в фокальном пятне оценивалась величиной  $4 \cdot 10^{19} \text{ Вт/см}^2$ , что почти на два порядка выше, чем до коррекции. Как следствие, при облучении пластиковой дейтериевой мишени нейтронный выход за импульс увеличился почти в тысячу раз, а также значительно увеличилось число генерируемых высоких гармоник от твердых поверхностей.

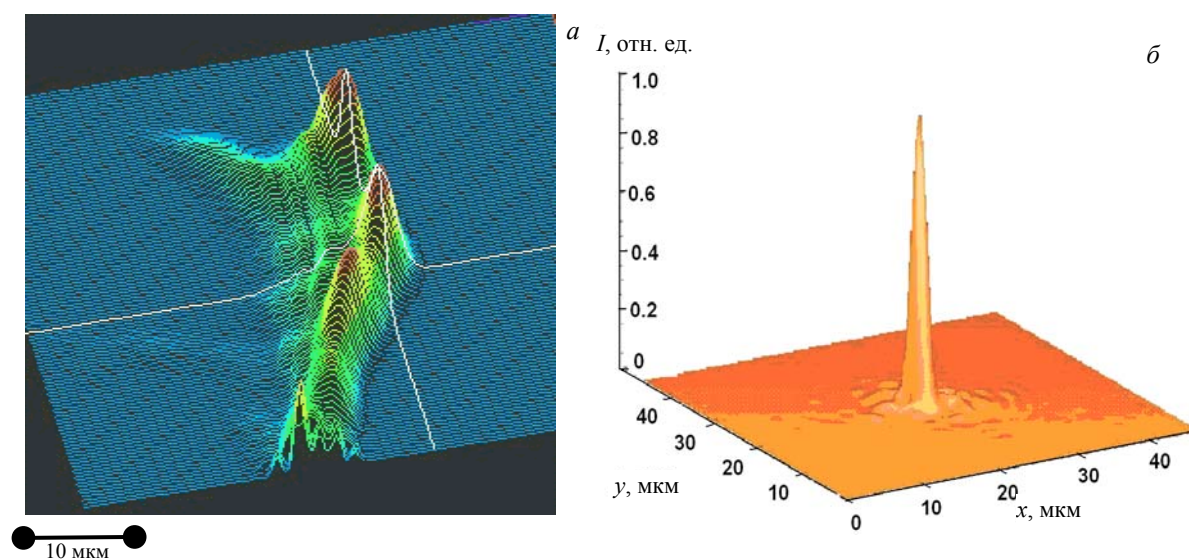


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения в фокальной плоскости параболического зеркала: *а* — до коррекции, *б* — после коррекции биморфным зеркалом *Б*

**Заключение.** На основе деформируемого биморфного зеркала и датчика волнового фронта шакармановского типа разработана адаптивная система коррекции лазерного излучения. Ее использование позволяет значительно улучшить качество излучения. Это подтверждено в действующей лазерной установке достижением острой фокусировки и высокой плотности мощности излучения в фокусе. Показана возможность формирования и коррекции излучения мощного фемтосекундного лазера с помощью двух биморфных зеркал вне оптического резонатора. В  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазере мощностью импульсов 10 ТВт при длительности 150 фс получена плотность излучения  $4 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> на плоскости фокусировки. Этому соответствует увеличение фактора Штреля излучения от 0.1 до 0.8.

Авторы статьи благодарят сотрудников Max-Planck-Institute of Quantum Optics (Германия) Х. Баумхаккера (H. Baumhacker), Г. Претцлера (G. Pretzler) и К. Дж. Витте (K. J. Witte) за предоставленную возможность проведения экспериментов на мощных лазерах с применением разработанной адаптивной системы и плодотворное сотрудничество.

- [1] G.Mourou, Ch.P.J.Barty, M.D.Perry. Phys. Today, **51** (1998) 22—28
- [2] А.Ахманов, В.А.Выслоух, А.С.Чиркин. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов, Москва, Наука (1988)
- [3] K.J.Witte, M.Basko, H.Baumhacker. Fusion Eng. Des., **44** (1999) 147—153
- [4] J.H.Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes, New York, Oxford University Press (1998)
- [5] S.Kokorowsky. J. Opt. Soc. Am., **69**, N 1 (1979) 181—187
- [6] М.А.Воронцов, А.В.Кудряшов, В.И. Шмальгаузен. Изв. вузов. Радиофизика, **27** (1984) 1419—1429
- [7] J.C.Dainty, A.V.Koryabin, A.V.Kudryashov. Appl. Opt., **37** (1998) 4663—4668
- [8] V.Ye.Zavalova, A.V.Kudryashov. Proc. SPIE, **4493** (2002) 277—282
- [9] A.L.Rukosuev, A.G.Alexandrov, V.Ye.Zavalova, V.V.Samarkin, A.V.Kudryashov. Proc. SPIE, **4493** (2002) 261—269
- [10] H.Baumhacker, G.Pretzler, K.J.Witte, M.Hegelich, M.Kaluza, S.Karsch, A.Kudryashov, V.Samarkin, A.Roukosouev. Opt. Lett., **27** (2002) 1570—1572