

Деформируемое зеркало на основе пьезоэлектрических приводов для адаптивной системы установки «Искра-6»

С.Ю.Бокало, С.Г.Гаранин, С.В.Григорович, В.Г.Жупанов, М.О.Колтыгин, С.М.Куликов, Д.М.Ляхов, А.Н.Маначинский, П.П.Мизин, А.В.Огородников, В.П.Смекалин, С.П.Смышляев, С.А.Сухарев, О.И.Шанин, В.И.Щипалкин

При создании мощных лазерных импульсных установок (NIF, LMJ, «Искра-6») основной проблемой после получения требуемых мощностей является формирование излучения необходимого качества. Для этой цели во всех трех установках используют адаптивные оптические системы (АОС). Настоящая работа посвящена определению характеристик и отработке наиболее проблемных элементов АОС – датчика волнового фронта и широкоапертурного адаптивного зеркала для установки «Искра-6».

Ключевые слова: лазер на неодимовом стекле, адаптивная оптическая система, датчик волнового фронта, адаптивное зеркало.

1. Введение

Все мощные лазерные системы нового поколения – National Ignition Facility (NIF, США) [1], Laser Megajoule (LMJ, Франция) [2] и «Искра-6» (Россия) [3] работают в импульсном режиме на длине волны 1.053 мкм, длительность импульса составляет 3–5 нс, а выходная энергия достигает 2 МДж (NIF, LMJ) и 300 кДж («Искра-6»). В настоящее время эксплуатируется установка «Луч» – модуль установки «Искра-6» [4, 5]. Наиболее важной задачей после получения требуемой выходной мощности является формирование излучения нужного качества. Для этого во всех трех установках предусмотрено использование адаптивных оптических систем (АОС) [6, 7], задачей которых является коррекция аберраций в «холодном» оптическом тракте (так называемых статических аберраций) и фазовых искажений вследствие нагрева активных элементов излучением накачки («тепловые» аберрации). Статические аберрации могут быть скорректированы в замкнутой АОС перед энергетическим пуском, причем больших требований к быстродействию системы не предъявляется (1–10 Гц). «Тепловые» аберрации корректируются предустановкой формы оптической поверхности деформируемого зеркала по результатам проведенных ранее измерений волновых фронтов, т. е. осуществляется программное управление зеркалом. Таким образом, в системе могут быть реализованы сразу две схемы организации контура управления – прямое управление деформируемым зеркалом по измеренному волновому фронту и управление с обратной связью. Необходи-

мость измерения формы волнового фронта практически однозначно требует использования адаптивной системы фазового сопряжения [8]. Основными элементами этой системы являются датчик волнового фронта (ДВФ), деформируемое зеркало (ДЗ), компьютер с программой управления и усилительная аппаратура. Отметим, что в нашем случае усилительная аппаратура и быстродействие программы управления не являются критичными, поэтому настоящая работа в основном посвящена отработке наиболее проблемных элементов АОС – датчика волнового фронта и широкоапертурного деформируемого зеркала – и определению их характеристик.

2. Место ДВФ и ДЗ в оптической схеме установки

На рис.1 приведен вариант оптической схемы одного канала установки «Искра-6» [3]. Лазерное излучение после выхода из системы формирования излучения (СФОИ) отражается от малого ДЗ 13, заводится в транспортный пространственный фильтр (ТПФ), после первого прохода отражается от широкоапертурного ДЗ 12, после второго прохода поворотным зеркалом через линзу 5 вводится в ячейку Поккельса (ЯП) 2, после третьего прохода второй раз отражается от широкоапертурного ДЗ 12 и после четвертого прохода направляется на мишень.

Требования к ДВФ в случае прямого управления деформируемым зеркалом по измеренному волновому фронту и управления с обратной связью существенно различны. В первом случае ДВФ должен иметь достаточно большой динамический диапазон, тогда как во втором случае он вырабатывает лишь сигнал ошибки (в идеале – нулевой) и требования к нему по динамическому диапазону существенно ниже. Однако появляются требования по линейности, точности и постоянной времени, обусловленные необходимостью устойчивой работы контура управления. Последнее требование несколько смягчается, т. к. контур управления может быть достаточно инерционным. В связи с этим целесообразно использовать в схеме один ДВФ с большим динамическим диапазоном для измерения суммарных аберраций волнового

С.Ю.Бокало, В.Г.Жупанов, Д.М.Ляхов, П.П.Мизин, В.П.Смекалин, О.И.Шанин, В.И.Щипалкин. ФГУП "НИИ НПО «Луч», Россия, 142100 Подольск Московской обл., ул. Железнодорожная, 24; e-mail: oshinin@luch.podolsk.ru
С.Г.Гаранин, С.В.Григорович, М.О.Колтыгин, С.М.Куликов, А.Н.Маначинский, А.В.Огородников, С.П.Смышляев, С.А.Сухарев. Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики ФГУП Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37; e-mail: garanin@otd13.vniief.ru

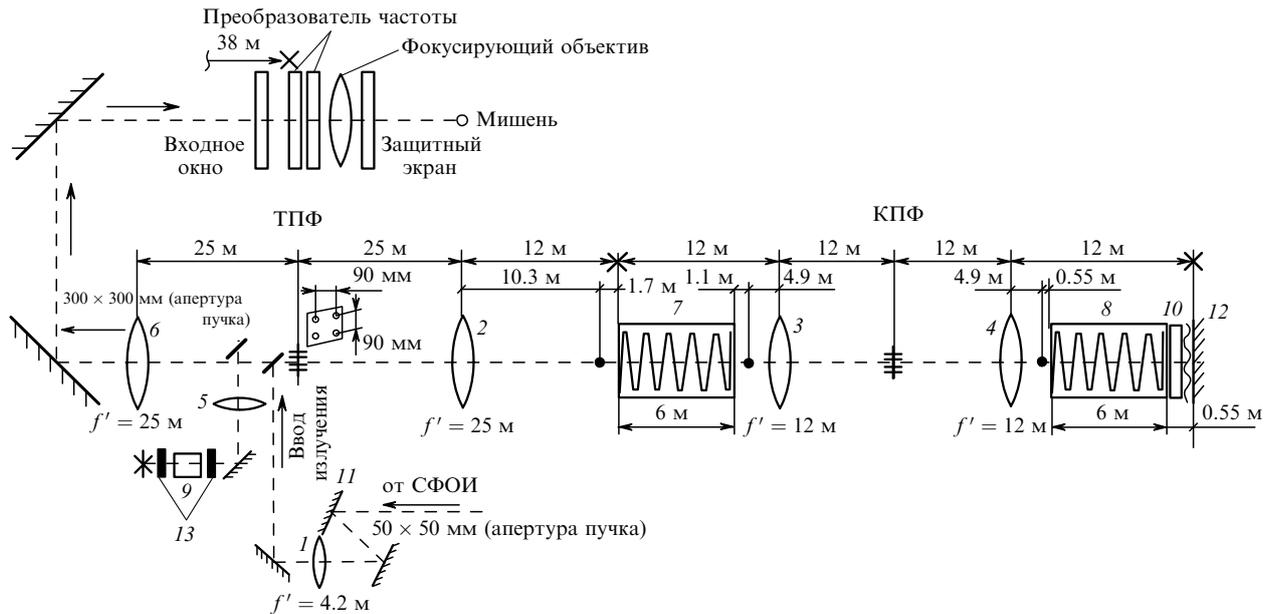


Рис.1. Вариант оптической схемы одного канала установки «Искра-6» (общая длина канала $L = 110$ м): 1–6 – линзы; 7, 8 – усилители моды (УМ); 9, 10 – ячейки Погкельса (ЯП); 11, 12 – деформируемые зеркала (ДЗ); 13 – поляризаторы; СФОИ – система формирования опорного излучения; ТПФ – транспортный пространственный фильтр; КПФ – кюветный пространственный фильтр; крестиками обозначены плоскости, сопряженные с деформируемым зеркалом, точками – места фокусировки обратноотраженных сигналов 1-го порядка.

фронта излучения после его выхода из канала. Деформируемое же зеркало может быть размещено в различных местах оптического тракта – от места выхода излучения из его системы формирования до места выхода излучения из канала. Возможна также система с двумя зеркалами, расположенными в различных местах оптического тракта, как показано на рис. 1.

Размещение зеркала на входе или выходе оптического тракта является крайним случаем с точки зрения требований к зеркалу и системе управления. В первом случае сложно реализовать достаточное пространственное разрешение на апертуре 50×50 мм (шаг между приводами должен быть не более 3.5 мм) и затруднена угловая селекция на первых проходах излучения в усилителе. Во втором случае необходимы высокая лучевая прочность широкоапертурного (300×300 мм) зеркала (гарантированный запас лучевой прочности должен превышать плотность выходной энергии (10 Дж/см^2) в 1.5–2 раза [9]) и его большой динамический диапазон; кроме того, ухудшается угловая селекция на последних двух проходах. Установка в тракте двух ДЗ может несколько снизить требования к каждому из них, но удвоит количество

необходимых элементов адаптивной оптической системы. При размещении зеркала за УМ 8 излучение отражается от него дважды – после первого и третьего проходов. Очевидно, что этот вариант наиболее сбалансирован с точки зрения как угловой селекции и коррекции излучения по всему оптическому тракту, так и предъявляемых к зеркалу требований. Кроме того, установка зеркала за усилителем 8 позволяет снизить требования к лучевой прочности покрытия и требования к приводу как по динамическому диапазону, так и по его силовым свойствам. При этом снизятся также емкость и стоимость привода, мощность и стоимость управляющей аппаратуры, а следовательно, стоимость системы в целом.

3. Датчик волнового фронта

Как уже отмечалось, установка «Луч» является прототипом установки «Искра-6». Для измерения волнового фронта выходного лазерного излучения на установке «Луч» в адаптивную систему включен ДВФ гартмановского типа, схема и фотография которого приведены на рис.2.

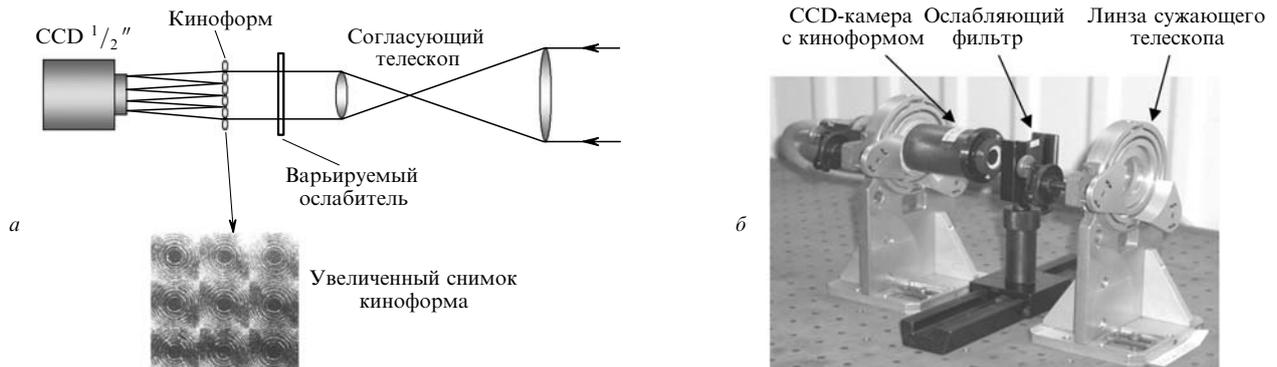


Рис.2. Схема (а) и внешний вид (б) ДВФ.

Согласующий телескоп предназначен для согласования апертуры пучка с размером приёмной площадки CCD-камеры, требуемую плотности энергии излучения на ней обеспечивает варьируемый ослабитель. Киноформный растр (киноформ) располагается в плоскости, сопряжённой с плоскостью деформируемого зеркала, и представляет собой регулярный массив дифракционных френелевских линз (субапертур) в квадратной упаковке. Растры изготовлены методом травления подложек из кварцевого стекла с использованием фотошаблона. Характерными особенностями растров являются высокая точность изготовления и идентичность отдельных элементов, а также высокая дифракционная эффективность (85% энергии сосредоточено в первом порядке дифракции).

Назначение растра в ДВФ – формирование системы фокальных пятен на CCD-камере, смещение которых относительно центров субапертур растра определяется локальным наклоном волнового фронта. Это позволяет реконструировать волновой фронт излучения, падающего на киноформ. ДВФ регистрируют картину фокальных пятен киноформа, по сдвигам которых восстанавливается поверхность волнового фронта.

Восстановление поверхности волнового фронта производится по измеренным градиентам (отклонениям фокальных пятен). Алгоритм восстановления основан на восстановлении поверхности волнового фронта с помощью схемы дискретизации Фрида [10].

Измерения статических aberrаций волнового фронта были проведены на выходе оптического тракта установки «Луч» с разрешением 0.07 точек/мм (14×14 точек измерений). При этом одна восстанавливаемая точка фазы волнового фронта соответствует участку пучка размером 14×14 мм, а информация об aberrациях внутри таких участков теряется. Экспериментальная информация о волновых фронтах использовалась для выбора характеристик широкоапертурного ДЗ.

4. Определение числа приводов и схемы их размещения на апертуре ДЗ

Принципиальным является вопрос выбора количества приводов и размещения их на апертуре ДЗ для компенсации заданных aberrаций с заданной остаточной ошибкой коррекции. На основании методики, изложенной в работе [11], было показано, что для этого при размещении приводов по квадратной сетке на апертуре должно быть не менее 121 привода, т. е. 11×11 рядов. В случае шахматной упаковки это число рядов реализуется при 60–61 приводе. Были исследованы различные шахматные упаковки приводов. Корректность расчетной методики подтверждена экспериментами с макетом ДЗ (см. разд.5).

4.1. Аппроксимация aberrаций

Экспериментальные данные о корректируемых aberrациях волнового фронта $W(x, z)$ аппроксимировались многочленом, который состоит из функций, описывающих собственные колебания пластины со свободными краями [12]:

$$W(x, z) = \sum_i \sum_j a_{ij} f(k_i, x) f(k_j, z), \quad (1)$$

где $f(k_i, x)$ и $f(k_j, z)$ – функции, описывающие собственные колебания пластины; x и z – нормированные координаты ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq z \leq 1$); k_i, k_j – безразмерные пространственные частоты собственных колебаний;

$$f(k_i, x) = A \left\{ - \left(\frac{-\sin k_i + \sinh k_i}{-\cos k_i + \cosh k_i} \right) \times [\cos(k_i x) + \cosh(k_i x)] + [\sin(k_i x) + \sinh(k_i x)] \right\} + a + bx;$$

A, a и b – некоторые коэффициенты. При этом зачастую число коэффициентов полинома равнялось числу точек, характеризующих измеренный волновой фронт. В этих случаях среднеквадратичное отклонение (СКО) σ найденных многочленов от экспериментальных данных для данного множества было равно нулю.

4.2. Расчет формы оптической поверхности

При расчете предполагалось, что действие приводов эквивалентно действию сил, приложенных в заданных точках к квадратной пластине со свободными краями.

Используя принципы виртуальных перемещений и суперпозиции, можно найти связь между приложенными силами P и коэффициентами многочлена (1), обозначив их вектором θ :

$$\theta = D^{-1} M^{-1} F P, \quad (2)$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины; F – матрица численных значений амплитуд собственных колебаний в заданных точках; $2M/D$ – диагональная матрица энергий собственных колебаний.

Учитывая ортонормированность функций, описывающих собственные колебания, СКО вычисленной поверхности от заданной таково:

$$\sigma = [(B - \theta)^T (B - \theta)]^{1/2}, \quad (3)$$

где B – вектор коэффициентов полинома (1), аппроксимирующего некоторую aberrацию.

Учитывая выражения (2) и (3), определим силы, обеспечивающие минимум $(B - \theta)^T (B - \theta)$ и, следовательно, нужную форму поверхности зеркала. Данные силы вычисляются по формуле

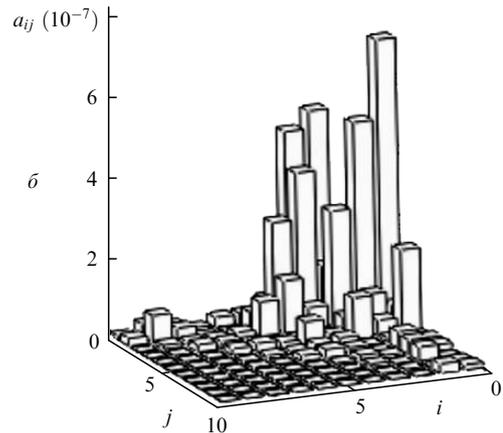
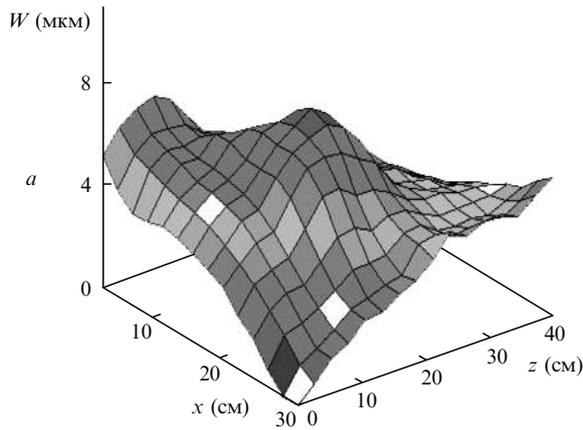
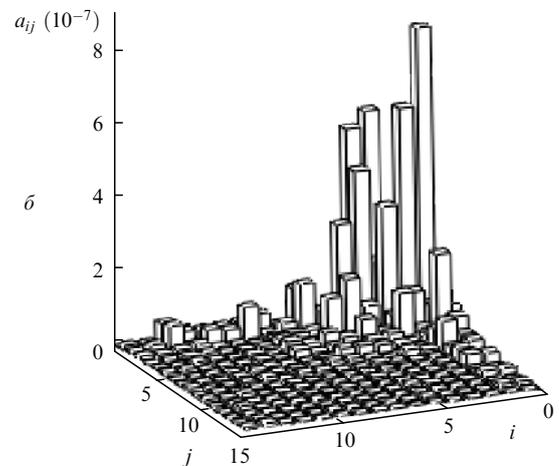
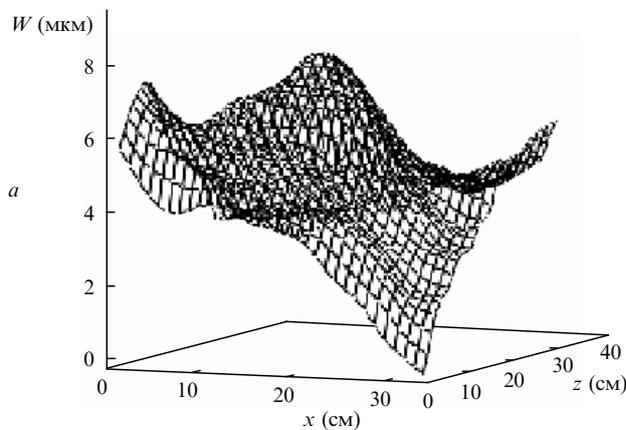
$$P' = (A^T F^T M^{-1} M^{-1} F A)^{-1} A^T F^T M^{-1} B D, \quad (4)$$

где A – матрица, обеспечивающая выполнение условий, при которых суммы моментов и сил, описываемых вектором P ($P = A P'$), равны нулю.

4.3. Анализ заданных экспериментальных волновых фронтов

С использованием методики, приведенной выше, были проведены расчеты коэффициентов аппроксимирующих полиномов для экспериментальных статических и «тепловых» aberrаций установки «Луч». В качестве примера на рис.3 приведена одна из реализаций измеренных aberrаций и соответствующих ей спектров разложения в ряд (1).

Из анализа имеющегося массива данных следует, что за исключением двух случаев отчетливо видна анизотропия по осям пространственных частот волнового фронта.

Рис.3. Форма волнового фронта (*a*) и спектр коэффициентов разложения при ее аппроксимации (*b*).Рис.4. Форма поверхности зеркала с 61 приводом (*a*) и спектр коэффициентов разложения при ее аппроксимации (*b*).

При этом, как правило, коэффициенты a_{ij} остаются значимыми до 14-го порядка разложения. По-видимому, именно анизотропией волнового фронта объясняется разное число рядов приводов по вертикали и горизонтали (7 и 11) в ДЗ установки NIF [6].

4.4. Необходимое количество приводов и схема их размещения на апертуре

Полученные в результате аппроксимации коэффициенты использовались для расчета сил, необходимых для отработки заданной геометрии поверхности упругой пластины. При этом рассматривалось шахматное расположение 32 приводов и 41 и 61 привода. Для всех вариантов aberrаций волнового фронта приемлемым с точки зрения допустимой ошибки коррекции оказалось только ДЗ с 61 приводом. Спектры коэффициентов, характеризующих форму вычисленных поперечных отклонений зеркала с 61 приводом, приведены на рис.4. Там же приведена форма вычисленной поверхности. СКО между поверхностями на рис.3,*a* и 4,*a* составляет 0.114 мкм.

Шахматное размещение приводов на апертуре ДЗ удачно согласуется с квадратной упаковкой линз киноформа ДВФ. При этом следует использовать 12×12 точек измерений ДВФ, которые могут быть оптически согласованы с ДЗ так, что на каждый привод придется по четыре периферийных точки измерения. Схема аппроксимации Фрида также вписывается в эту концепцию. Все это позволяет надеяться на построение эффективного алгоритма управления.

5. Макет ДЗ и результаты испытаний

В соответствии с полученными характеристиками был разработан, изготовлен и испытан девятиканальный макет деформируемого зеркала. Его внешний вид без защитного кожуха, крышки и ручек приведен на рис.5.

Зеркальная пластина выполнена из оптического ситалла. На полированную переднюю оптическую поверхность нанесено покрытие, коэффициент зеркального отражения которого на рабочей длине волны составляет не менее 99.3%, а лучевая прочность – не менее 20 Дж/см² при длительности импульса излучения 3 нс [13].

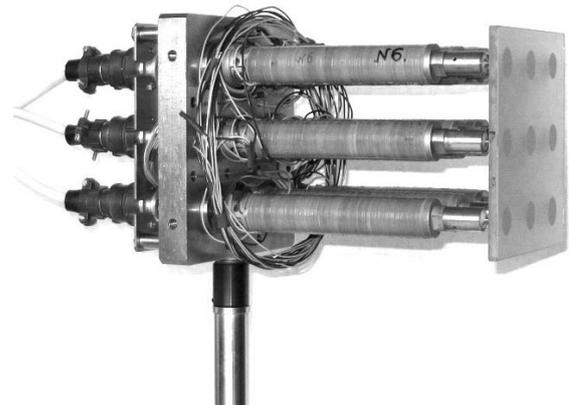


Рис.5. Макет адаптивного зеркала.

Табл.1. Характеристики приводов на различных стадиях изготовления зеркала (рабочее напряжение на приводе ± 300 В).

Параметры привода	Номер привода								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Статическая емкость (мкФ)	1.043	1.168	1.144	1.091	1.053	1.158	1.066	1.166	1.157
Перемещения в исходном состоянии (мкм)	+27.0	+30.5	+29.2	+30.1	+31.0	+33.5	+28.4	+32.2	+31.2
	-30.0	-30.0	-31.7	-26.5	-26.5	-29.5	-27.0	-28.0	-29.5
Среднее значение перемещений (мкм)	28.5	30.25	30.45	28.3	28.75	31.5	27.7	30.1	30.35
Перемещения при закреплении на плите (мкм)	+23.3	+28.0	+25.6	+26.0	+25.0	27.0	+24.3	+26.6	+25.7
	-32.6	-30.5	-33.8	-29.1	-32.0	-36.0	-27.2	-33.8	-33.7
Среднее значение перемещений (мкм)	27.95	29.25	29.7	27.55	28.5	31.5	25.75	30.2	29.7
Перемещения в составе зеркала (мкм)	+24.6	+18.9	+22.7	+18.9	+15.1	+18.9	+20.8	+20.8	+22.7
	-18.9	-17.0	-18.9	-17.0	-13.2	-17.0	-17.0	-17.0	-18.9
Среднее значение перемещений (мкм)	21.75	17.95	20.8	17.95	14.15	17.95	18.9	18.9	20.8
Средняя чувствительность (мкм/кВ)	72.5	59.8	69.3	59.8	47.2	59.8	63	63	69.3
Отношение среднего перемещения в составе зеркала к исходному среднему значению	0.763	0.593	0.683	0.634	0.492	0.570	0.682	0.628	0.685

В качестве управляющих использовались пьезоэлектрические приводы, представляющие собой полый керамический цилиндр, состоящий из многих слоев пьезокерамики ЦТС-19 и армированный центральной шпилькой. В свободном состоянии такой пьезопривод перемещается не менее чем на ± 24 мкм при рабочем напряжении ± 300 В. К каждому приводу присоединены наконецник и хвостовик, служащие для последующего подсоединения управляющих приводов соответственно к зеркальной пластине и корпусу. Приводы расположены по квадратной сетке.

Корпус выполнен из инвара. Хвостовики управляющих приводов крепятся к корпусу гайками. Присоединение зеркальной пластины к управляющим приводам осуществляется при помощи клея через толкатели.

На тыльной поверхности корпуса установлена панель, на которой закреплены три электрических разъема. Защитные кожух и крышка, выполненные из органического стекла, предохраняют управляющие приводы и оптическую поверхность зеркальной пластины от случайных механических повреждений.

Изготовленный макет был тщательно исследован. Приведем здесь лишь наиболее важные результаты испытаний. В табл.1 представлены характеристики приводов на различных стадиях изготовления зеркала. Приводы 1, 3, 7 и 9 являются угловыми, 2, 4, 6 и 8 – промежуточными (расположены между угловыми), а привод 5 – центральным.

Обратим внимание на высокую среднюю чувствительность приводов, которая позволяет в 2–4 раза уменьшить длину активной части привода, предназначенного для установки «Искра-6». Жесткость связей между корпусом и зеркальной пластиной, включающих привод и узлы крепления, оказалась в 4–10 раз меньше исходной жесткости собственно привода, при этом наблюдалась четырехкратная асимметрия жесткости на растяжение и сжатие для одного привода. Функции отклика при подаче положительного и отрицательного напряжений на приводы различались (отсутствовала симметрия), также различались функции отклика однотипных приводов. СКО функций отклика угловых приводов (1, 3, 7, 9) при положительном напряжении достигало 0.3 мкм, при отрицательном – 0.12 мкм. В свою очередь СКО функций отклика промежуточных приводов (2, 4, 6, 8) при поло-

жительном напряжении не превышало 0.2 мкм, при отрицательном – 0.13 мкм. СКО функций отклика центрального привода при положительном и отрицательном напряжениях было равно 0.189 мкм.

Исходя из этого можно предположить, что, несмотря на дальнейшую обработку конструкции и технологии изготовления, характеристики зеркал будут довольно индивидуальными, и для программного управления компенсацией «тепловых» aberrаций потребуется тщательная паспортизация каждого зеркала.

Вместе с тем проведенные эксперименты и расчеты свидетельствуют об удовлетворительной управляемости зеркала. Из интерферограмм на рис.6 видно, что можно получить практически идеальную плоскость (исходная

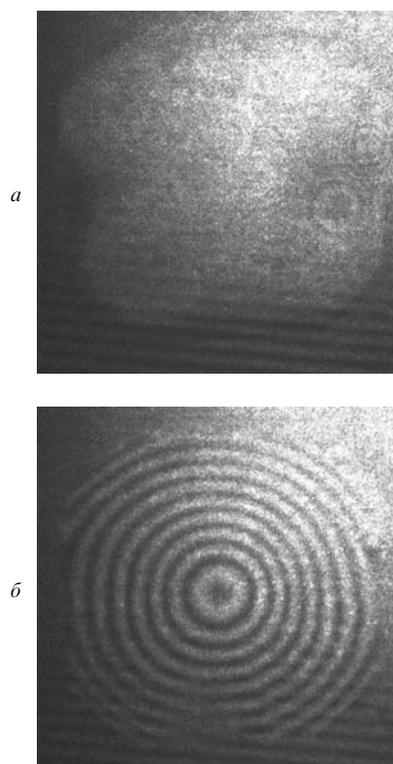


Рис.6. Интерферограммы начальной формы поверхности после выравнивания (а) и после отработки сферы (б).

форма имела астигматизм с числом полос на интерференционной картине $N = 4$) и сферу. Управление формой поверхности осуществлялось от компьютера через специальный девятиканальный блок управления, который обеспечивал подачу напряжений ± 300 В с точностью 1В и частотой до 20 Гц.

Измеренную на установке «Луч» форму «тепловой» абберации «отрабатывали» поверхностью макета зеркала расчетным (по методике, изложенной в разд.4) и экспериментальным путем (с использованием измеренных функций отклика каждого привода). СКО расчетной поверхности от заданной составило 0.401 мкм, а от экспериментальной – 0.467 мкм (в работе [7] экспериментально полученная ошибка коррекции для аналогичной абберации составила 0.6 мкм).

6. Заключение

Синтезированная АОС установки «Искра-6» является системой фазового сопряжения, в которой используется прямое управление деформируемым зеркалом по измененному волновому фронту и управление с обратной связью. ДВФ в такой системе целесообразно размещать на выходе, а широкоапертурное ДЗ – в середине усилительного тракта. В результате проведенного комплекса расчетных и экспериментальных исследований опреде-

лены и обоснованы параметры основных компонентов адаптивной оптической системы установки «Искра-6»: датчика волнового фронта и широкоапертурного деформируемого зеркала. Разработаны, изготовлены и испытаны прототип ДВФ и макет ДЗ.

1. LLNL. *ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility* (Virginia: Springfield, 1997. v. 7, № 3).
2. Andre M.L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3047**, 38 (1996).
3. Galakhov I.V., Garanin S.G., Eroshenko V.A., et al. *Fusion Engineering and Design*, **44**, 51 (1999).
4. Sukharev S.A., in. *Proc. III Intern. Conf. SSLA to ICF* (Monterey, Cal., 1998).
5. Воронич И.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г. и др. *Квантовая электроника*, **33** (6), 485 (2003).
6. Zacharias R.A., Beer N.R., Bliss E.S., et al. *Opt. Eng.*, **43** (12), 2873 (2004).
7. Воронич И.Н., Гаранин С.Г., Зарецкий А.И. и др. *Квантовая электроника*, **35** (2), 140 (2005).
8. Тараненко В.Г., Шанин О.И. *Адаптивная оптика в приборах и устройствах* (М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2005).
9. Алексеев В.Н., Бессараб А.В., Гаранин С.Г., Дмитриев Д.И. и др. *Оптич. журн.*, **9** (1), 11 (2002).
10. Фрид Д. В сб. *Адаптивная оптика* (М.: Мир, 1980, с. 332).
11. Ляхов Д.М., Шанин О.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **39** (6), 55 (1995).
12. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. *Колебания в инженерном деле* (М.: Машиностроение, 1985).
13. Бабаянц Г.И., Гаранин С.Г., Жупанов В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **35** (7), 663 (2005).