

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

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

В настоящее время создаются мощные лазерные системы нового поколения – National Ignition Facility (NIF, США), Laser Megajoule (LMJ, Франция) и "Искра-6" (Россия). Наиболее важной задачей после получения мощностных характеристик является формирование излучения нужного качества. Для этого во всех трех установках предусмотрено использование адаптивных оптических систем (АОС). Настоящая работа в основном посвящена определению характеристик и отработке наиболее проблемных элементов АОС – датчика волнового фронта и широкоапертурного деформируемого зеркала для установки "Искра-6".

1. Введение

В настоящее время создаются мощные лазерные системы нового поколения: National Ignition Facility (NIF, США) [1], Laser Megajoule (LMJ, Франция) [2] и "Искра-6" (Россия) [3]. Все эти установки работают в импульсном режиме на длине волны 1,053 мкм с продолжительностью импульса 3...5 нс, в течение которых выдают энергию до 2 МДж (NIF, LMJ) и 300 кДж ("Искра-6"). В настоящее время эксплуатируется модуль установки "Искра-6" – установка "Луч" [4, 5]. Наиболее важной задачей после получения мощностных характеристик 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 ранее измеренных 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

фронт и управление с обратной связью. Необходимость измерения формы волнового фронта практически однозначно диктует использование 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 определению характеристик и отработке наиболее проблемных элементов АОС: датчика волнового фронта и широкоапертурного деформируемого зеркала.

2. Место ДВФ и ДЗ в оптической схеме установки

На рис. 1 приведен вариант оптической схемы одного канала установки "Искра-6". Излучение системы формирования излучения (СФОИ) отражается от малого ДЗ, заводится в транспортный пространственный фильтр (ТПФ), после 1-го прохода отражается от широкоапертурного ДЗ, после 2-го прохода через линзу Л7 вводится в ячейку Поккельса (ЯП), после 3-го прохода второй раз отражается от широкоапертурного ДЗ и после 4-го прохода направляется на мишень.

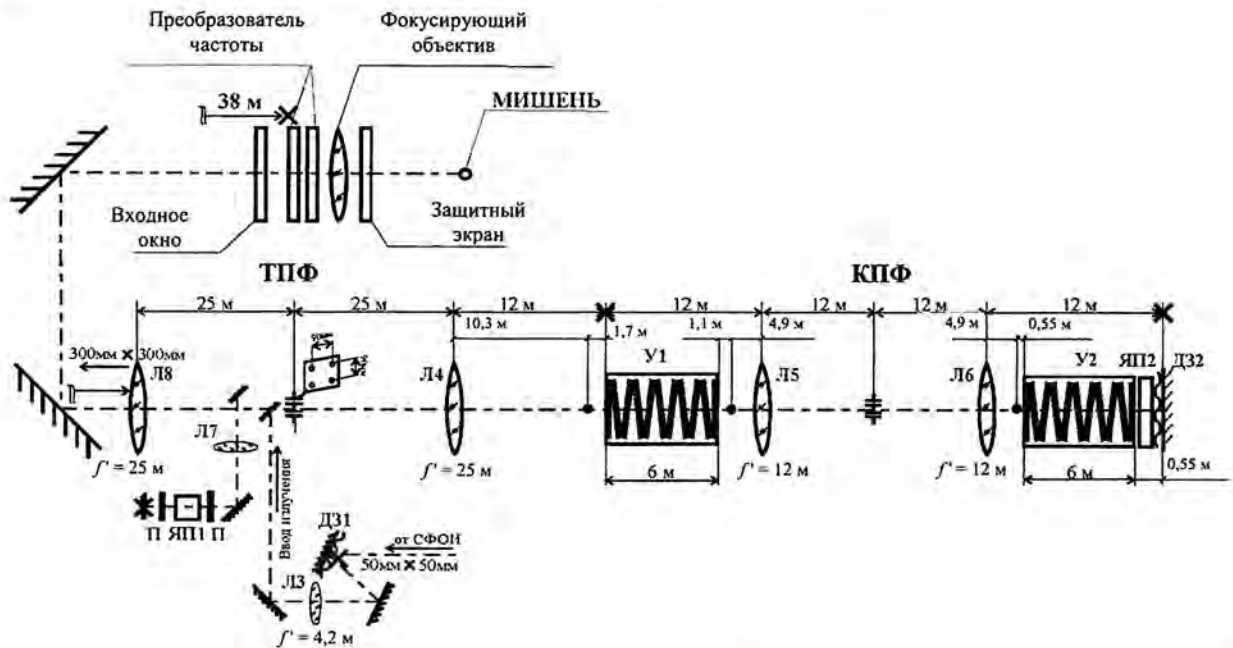


Рис. 1. Вариант оптической схемы установки "Искра-6" (Общая длина канала $L = 110$ м; X – плоскости, сопряженные с деформируемым зеркалом; • – места фокусировки обратно-отраженных сигналов 1-го порядка; КПФ – кюветный пространственный фильтр; У – усилительный модуль; П – поляризатор)

Требования к ДВФ для прямого управления деформируемым зеркалом по измеренному волновому фронту и управлению с обратной связью существенно различны. В первом случае мы должны иметь ДВФ с достаточно большим динамическим диапазоном, тогда как во втором случае ДВФ вырабатывает лишь сигнал ошибки (в идеале нулевой), и требования по динамическому

диапазону к нему существенно ниже, но появляются требования по линейности, точности и постоянной времени для устойчивой работы контура управления. Последнее несколько смягчается, так как контур управления может быть достаточно медленным. В связи с этим целесообразно использовать в схеме один ДВФ с большим динамическим диапазоном для измерения суммарных aberrаций волнового фронта излучения на выходе излучения из канала. Деформируемое же зеркало может быть размещено в различных местах оптического тракта – от места выхода излучения из системы формирования излучения до места выхода излучения из канала. Можно также представить себе систему с двумя зеркалами, расположенными в различных местах оптического тракта, как показано на рис. 1 [3].

Размещение зеркала на входе или выходе оптического тракта является крайними случаями с точки зрения предъявления требований к зеркалу. В первом случае затруднительно реализовать достаточное пространственное разрешение на апертуре 50×50 мм (шаг между приводами должен быть не более 3,5 мм) и затрудняется угловая селекция на первых проходах излучения в усилителе. Во втором случае необходима высокая лучевая стойкость (гарантированный запас по лучевой прочности должен превышать плотность выходной энергии (10 Дж/см^2) в 1,5–2 раза [9]) широкоапертурного (300×300 мм) зеркала и его большой динамический диапазон. Также ухудшается угловая селекция на последних двух проходах. Установка в тракте двух деформируемых зеркал может несколько снизить требования к каждому из зеркал, но удвоит количество элементов адаптивной оптической системы. При размещении зеркала за усилителем У2 излучение отражается от него дважды – после 1-го и 3-го проходов. Очевидно, 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 У2 позволяет снизить требования по лучевой прочности покрытия и требования к приводу как по динамическому диапазону, так и по его силовым свойствам. При этом также снизится емкость и стоимость привода, мощность и стоимость управляющей аппаратуры и, соответственно, 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 составе адаптивной системы применяется датчик гартмановского типа. На рис. 2 представлена схема датчика волнового фронта. Фотография выходного ДВФ приведена на рис. 3.

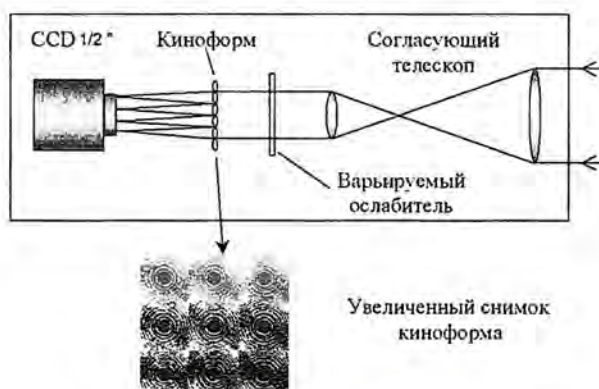


Рис. 2. Схема датчика волнового фронта

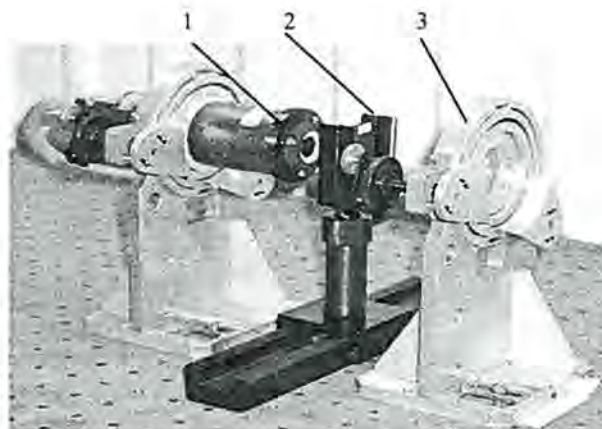


Рис. 3. Датчик волнового фронта: 1 – CCD камера с киноформом; 2 – ослабляющий фильтр; 3 – линза сужающего телескопа

Согласующий телескоп предназначен для согласования апертуры пучка с размером приемной площадки CCD-камеры. Варьируемый ослабитель необходим для обеспечения требуемой плотности энергии излучения на приемной площадке CCD-камеры. Киноформный растр (киноформ) располагается в плоскости, сопряженной плоскости деформируемого зеркала.

Киноформ 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, 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 (набора дифракционных линз, выравненных на стеклянной подложке), 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 14×14 мм, а информация об aberrациях внутри таких участков теряется. Экспериментальная информация о волновых фронтах использовалась далее 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, то есть 11×11 рядов. В случае шахматной упаковки 11×11 рядов реализуются при 60...61 приводе. Были исследованы

различные шахматные упаковки приводов. Корректность расчетной методики была подтверждена экспериментами с макетом ДЗ (см. п. 5).

4.1. Аппроксимация аберраций

Экспериментальные данные о корректируемых аберрациях волнового фронта $W(x, z)$ аппроксимировались многочленом, состоящим из собственных колебаний пластины со свободными краями [12]:

$$W(x, z) = \sum_i \sum_j a_{i,j} f(k_{1i}, x) f_1(k_{1j}, z), \quad (1)$$

где $f(k_1, x) := A \left[- \left(\frac{-\sin(k_1) + \sin h(k_1)}{-\cos(k_1) + \cos h(k_1)} \right) (\cos(k_1 x) + \cos h(k_1 x)) + (\sin(k_1 x) + \sin h(k_1 x)) \right] + a + bx;$

A, a и b – некоторые коэффициенты, k_1 – частота собственных колебаний.

При этом зачастую количество коэффициентов полинома равнялось числу точек, характеризующих волновой фронт. Следовательно, среднее квадратичное отклонение (СКО) найденных многочленов равнялось нулю для данного множества.

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 \mathbf{P} и коэффициентами многочлена (1). Обозначим их как вектор $\boldsymbol{\theta}$. Получим

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

где D – цилиндрическая жесткость пластины; F – матрица численных значений собственных колебаний в заданных точках; $\frac{2}{D} M$ – диагональная матрица энергий собственных колебаний.

Учитывая ортонормированность функций описывающих собственные колебания, СКО вычисленной поверхности равно

$$(\mathbf{B} - \boldsymbol{\theta})^T (\mathbf{B} - \boldsymbol{\theta}), \quad (3)$$

где \mathbf{B} – вектор коэффициентов полинома (1), аппроксимирующего некоторую аберрацию.

Учитывая выражения (2) и (3), определим силы, обеспечивающие минимум

$$(\mathbf{B} - \boldsymbol{\theta})^T (\mathbf{B} - \boldsymbol{\theta})$$

и, следовательно, нужную форму поверхности зеркала. Данные силы вычисляются по формуле:

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

где A – матрица, при которой суммы моментов и сил, образующих вектор $\mathbf{P} = A \mathbf{P}'$, равны нулю.

4.3. Анализ заданных экспериментальных волновых фронтов

Используя методику, приведенную в предыдущих разделах, были проведены расчеты коэффициентов аппроксимирующих полиномов для экспериментальных статических и «тепловых» aberrаций установки "Луч". В качестве примера на рис. 4 приведена одна из реализаций измеренных aberrаций и соответствующих ей спектров разложения в ряд (1).

На основании анализа имеющегося массива данных следует, что за исключением двух случаев отчетливо видна анизотропия пространственных частот волнового фронта по осям. При этом, как правило, коэффициенты остаются значимыми до 14-го порядка. По-видимому, именно анизотропией волнового фронта объясняется разное количество рядов приводов по вертикали и горизонтали (7 и 11) в ДЗ установки NIF [6].

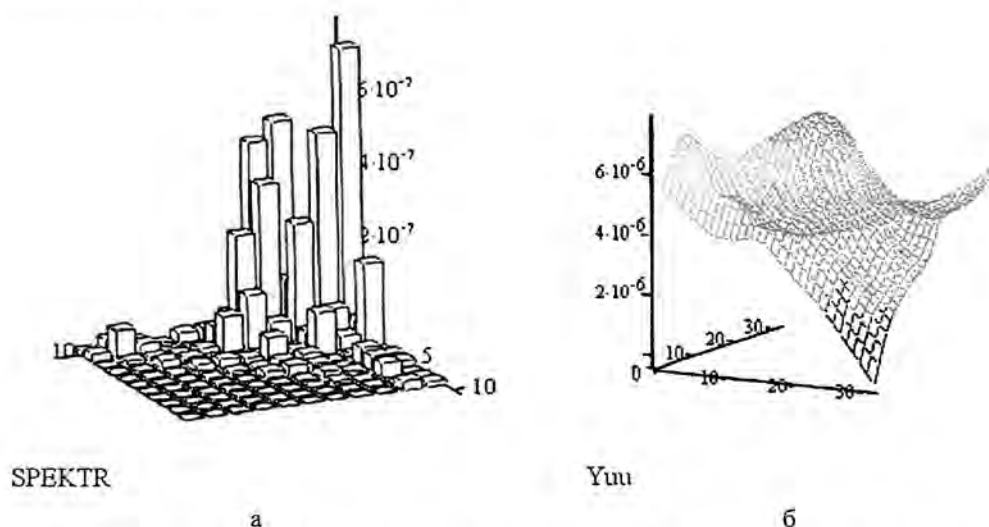


Рис. 4. Форма волнового фронта (б) и спектр коэффициентов разложения (а) при ее аппроксимации

4.4. Необходимое количество приводов и схема их размещения на апертуре

Полученные в результате аппроксимации коэффициенты, использовались для расчета сил, необходимых для обработки заданной геометрии поверхности упругой пластины. При этом рассматривались три варианта шахматного расположения приводов: 1) 32 привода; 2) 41 привод; 3) 61 привод. 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. 5. Там же приведена форма вычисленной поверхности. СКО между поверхностями, изображенными на рис. 6б и 7б, 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 согласованы с ДЗ оптически 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.

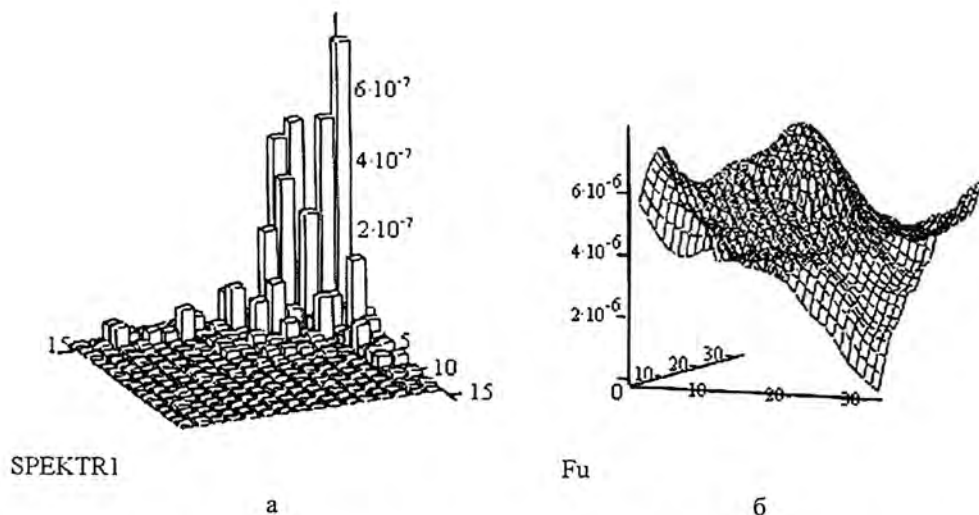


Рис. 5. Форма поверхности зеркала с 61 приводом (б) и спектр коэффициентов разложения при ее аппроксимации (а)

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. 6.

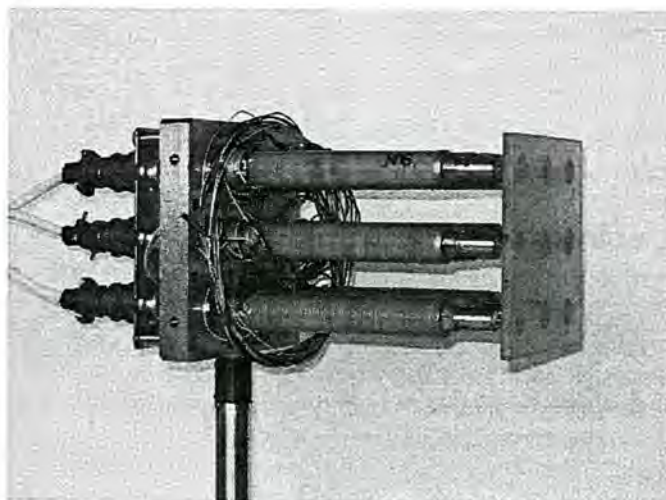


Рис. 6. Макет адаптивного зеркала

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 3 нс [13].

В качестве управляющего привода использовался пьезоэлектрический привод, представляющий собой полый керамический цилиндр, состоящий из многих слоев пьезокерамики ЦТС-19,

армированный центральной шпилькой. Перемещение такого пьезопривода в свободном состоянии составляет не менее ± 24 мкм при рабочем напряжении ± 300 В. К приводу присоединялись наконечник и хвостовик, служащие для последующего подсоединения управляющих приводов соответственно к зеркальной пластине и корпусу. Приводы расположены по квадратной сетке с межцентровым расстоянием 44 мм.

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 разъемов, на которой закреплены три электрических разъема. Защитные кожух и крышка, выполненные из органического стекла, предохраняют от случайных механических повреждений управляющие приводы и оптическую поверхность зеркальной пластины.

Изготовленный макет был тщательно исследован. Приведем здесь лишь наиболее важные результаты испытаний. В таблице приведены характеристики приводов на различных стадиях изготовления зеркала. Приводы 1, 3, 7 и 9 являются угловыми, приводы 2, 4, 6 и 8 – промежуточными между ними, привод 5 – центральный.

Характеристики приводов на различных стадиях изготовления зеркала (± 300 В на приводе)

| Характеристики | 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, 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, мкм | 27,95 | 29,25 | 29,7 | 27,55 | 28,5 | 31,5 | 25,75 | 30,2 | 29,7 |
| Перемещение 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, 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 к исходному среднему | 0,763 | 0,593 | 0,683 | 0,634 | 0,492 | 0,570 | 0,682 | 0,628 | 0,685 |

Обратим внимание на высокую среднюю чувствительность приводов. Это 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 асимметрия жесткости на растяжение и сжатие, достигающая 4 для одного привода. Функции отклика при подаче положительного и отрицательного напряжения на приводы различались (отсутствовала симметрия), также различались функции отклика однотипных приводов. Среднее квадратичное отклонение между функциями отклика угловых приводов (1, 3, 7, 9) при положительном напряжении достигало 0,3 мкм, при отрицательном – 0,12 мкм. СКО между функциями отклика промежуточных приводов (2, 4, 6, 8) при положительном напряжении – не более 0,2 мкм, при отрицательном – 0,13. СКО функций отклика центрального привода при положительном и отрицательном напряжении равно 0,189 мкм.

Исходя из этого, можно предположить, что, несмотря на дальнейшую отработку 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 приведенных на рис. 7 и 8 интерферограмм видно, что можно получить практически идеальную плоскость (исходная форма имела астигматизм с $N = 4$) и сферу. Управление формой поверхности осуществлялось от компьютера через специальный 9-канальный блок управления, который обеспечивал подачу напряжений в $\pm 300\text{В}$ с точностью 1В и частотой до 20 Гц.

Измеренную на установке "Луч" форму "тепловой" aberrации "отрабатывали" поверхностью макета зеркала расчетным (по методике, изложенной в п. 4) и экспериментальным путем (с использованием измеренных функций отклика каждого привода). СКО расчетной поверхности от заданной составило 0,401 мкм, а экспериментальной – 0,467 мкм (в работе [7] экспериментально полученная ошибка коррекции для аналогичной aberrации составила 0,6 мкм).



Рис. 7. Начальная форма поверхности после выравнивания



Рис. 8. Отработка сферы поверхностью ДЗ

6. Заключение

Синтезированная АОС установки "Искра-6" является системой фазового сопряжения, в которой используется прямое управление деформируемым зеркалом по измеренному 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 определены и обоснованы параметры основных компонент адаптивной оптической системы установки "Искра-6": датчика волнового фронта и широкоапертурного деформируемого зеркала. Разработаны, изготовлены и испытаны прототип ДВФ и макет ДЗ.

Список литературы

1. Lawrence Livermore National Laboratory. ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility. April–June 1997. Vol. 7, № 3.
2. Andre M. L. Status of the LMJ Project // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3047. P. 38.

3. Galakhov I. V., Garanin S. G., Eroshenko V. A., Kirillov G. A., Kochemasov G. G., Murugov V. M., Rukavishnikov N. N., Sukharev S. A. Concept of the "Iskra-6" Nd-laser facility. *Fusion Engineering and Design*. 1999. T. 44. С. 51–56.
4. Sukharev S. A. High-power neodymium phosphate glass laser facility "Luch" – prototype of a module of the "Iskra-6" facility // *Proc. SPIE*. 1999. Vol. 3492. P. 12–24.
5. Воронич И. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Измерение коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла // *Квантовая электроника*. 2003. Т. 33, № 6. С. 485–488.
6. Zacharias R. A., Beer N. R., Bliss E. S. et al. Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility. *Optical Eng.* December 2004. Vol. 43(12). P. 2873–2884.
7. Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зарецкий А. И. и др. Уменьшение aberrаций волнового фронта и расходимости лазерного излучения на установке "Луч" с помощью адаптивной системы // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35, № 2. С. 140–142.
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. Исследование лучевой прочности поверхности экспериментального лазерного стекла // *Оптический журнал*. 2002. Т. 9, № 1. С. 11–15.
10. Фрид Д. Построение оценки искажений волнового фронта методом наименьших квадратов по множеству измерений разности фаз // *Адаптивная оптика*. М.: Мир, 1980. С. 332–348.
11. Ляхов Д. М., Шанин О. И. Оптимальное управление формой оптической поверхности гибкого зеркала // *Известия РАН. Сер. Физическая*. 1995. Т. 39, № 6. С. 55–61.
12. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
13. Бабаянц Г. И., Гаранин С. Г., Жупанов В. Г. и др. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35, № 7. С. 663–666.

Deformable Mirror Based on Piezoelectric Drives Assigned for the Adaptive System of "Iskra-6" Facility

S. G. Garanin, S. V. Grigorovich, M. O. Kolygin, S. M. Kulikov,
A. N. Manachinsky, A. V. Ogorodnikov, S. P. Smyshlyaev, S. A. Sukharev,
S. Yu. Bokalo, V. G. Zhupanov, D. M. Lyakhov, P. P. Mizin, V. P. Smekalin,
O. I. Shanin, V. I. Shipalkin

To date the new generation powerful laser systems are being developed, represented by the National Ignition Facility (NIF, USA), Laser Megajoule (LMJ, France) and "Iskra-6" (Russia). Generation of qualitative radiation on "tailored-to-need" base is contemplated as the second task, still of no less importance, after gaining the appropriate power characteristics. To meet these goals the adaptive optical systems (AOS) are implied for all the three facilities in focus. The present paper mainly deals with identification of basic characteristics and mastering of the AOS most problematic elements, like the wave front sensor and the wide-aperture deformable mirror, constituent of "Iskra-6" facility.