

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 535.8, 608.1

Исследование охлаждаемого деформируемого зеркала на пьезоактюаторах для коррекции атмосферных флуктуаций фазы

В.В. Топоровский^{1,2}, А.В. Кудряшов^{1,2}, В.В. Самаркин¹, А.Л. Рукоусев¹,
А.Н. Никитин¹, Ю.В. Шелдакова¹, О.В. Отрубянникова^{1*}

¹Институт динамики геосфер РАН
119334, г. Москва, ул. Академика Зелинского, 38/1
²Московский политехнический университет
107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

Для компенсации aberrаций лазерного излучения, прошедшего турбулентную атмосферу, был разработан корректор волнового фронта – охлаждаемое деформируемое зеркало на пьезоактюаторах. В работе представлены теоретические оценки, позволяющие определить основные характеристики подобного зеркала. Экспериментально изучен предложенный способ охлаждения отражающей поверхности корректора волнового фронта через пьезоактюаторы. Приведены результаты измерений основных характеристик деформируемого зеркала: начальной формы поверхности, функций отклика актюаторов, рабочего диапазона и амплитудно-частотной характеристики перемещения оптической поверхности.

Ключевые слова: адаптивная оптика, корректор волнового фронта, деформируемое зеркало, мощное лазерное излучение; adaptive optics, wavefront corrector, deformable mirror, high-power laser radiation.

Введение

При решении задач, связанных с использованием непрерывных лазеров мощностью несколько десятков киловатт, широко используются методы адаптивной оптики [1–5]. Задача управления лазерным пучком становится особенно актуальной при распространении излучения на большие расстояния, когда на его фазу влияет атмосферная турбулентность. Адаптивные системы позволяют эффективно компенсировать крупномасштабные искажения излучения, изменяющиеся с частотами порядка нескольких герц [6–8], при этом в качестве исполнительного элемента корректора волнового фронта для подобного рода aberrаций чаще всего используется гибкое зеркало на основе биморфного пьезоэлемента [9, 10], а для измерения оптических неоднородностей – датчики волнового фронта: датчики кривизны [11], пирамидальные [12], но самыми популярными являются датчики волнового фронта Шака–Гартмана [13, 14]. Однако, когда речь заходит о необходимости коррекции фазовых искажений при распространении лазер-

ного излучения через атмосферную турбулентность, использование биморфных зеркал малоэффективно из-за их неспособности воспроизводить, а значит и компенсировать мелкомасштабные aberrации, изменяющиеся с высокой частотой [15, 16].

Мы разработали и исследовали гибкое адаптивное зеркало с пьезоактюаторами, предназначенное для использования в задачах компенсации искажений мощных, в том числе и непрерывных, лазерных пучков, прошедших турбулентную среду. Отличительные особенности данного корректора волнового фронта – это высокая резонансная частота, возможность компенсации мелкомасштабных aberrаций, охлаждение отражающей поверхности, а также простота замены пьезопакетов, входящих в состав пьезоактюаторов, в случае их повреждения.

Конструкция традиционного зеркала на пьезоактюаторах

Традиционное пьезоактюаторное деформируемое зеркало представляет собой толстое плоское основание, к которому приклеиваются пьезопакеты, состоящие из набора тонких (~ 100 мкм) однослойных пьезокерамических дисков, спеченных между собой. К другой стороне пьезопакетов приклеивается достаточно тонкая подложка зеркала, на которую наносится отражающее диэлектрическое или металлическое покрытие [17, 18].

* Владимир Владимирович Топоровский (topor@activeoptics.ru); Алексей Валерьевич Кудряшов (kud@activeoptics.ru); Вадим Васильевич Самаркин (samarkin@activeoptics.ru); Алексей Львович Рукоусев (alru@activeoptics.ru); Александр Николаевич Никитин (nikitin@activeoptics.ru); Юлия Вячеславовна Шелдакова (sheldakova@nightn.ru); Ольга Владиславовна Отрубянникова (otrubbyannikova@activeoptics.ru).

Деформируемое зеркало устанавливается в металлический корпус. На задней части корпуса располагается электрический разъем для подключения электронного блока управления зеркалом. При подаче электрического напряжения на электроды пьезопакета его первоначальная длина (толщина) l_0 изменяется вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта. Величина изменения длины Δl пропорциональна напряженности электрического поля E , созданной в пьезоматериале, длине пьезопакета l_0 и так называемому толщинному пьезомодулю d_{33} [19]: $\Delta l = d_{33}El_0$. Это смещение приводит к локальной деформации отражающей пластины в месте расположения пьезопакета. При подаче на такие управляющие элементы набора различных напряжений можно формировать произвольную форму поверхности зеркала.

Необходимо отметить, что традиционная конструкция подобного зеркала не лишена недостатков. Во-первых, нет возможности заменить пьезопакеты в случае их повреждения. Во-вторых, отдельный пьезокерамический элемент может развить значительную толкающую составляющую силы перемещения, но не может полностью компенсировать противодействующую силу подложки деформируемого зеркала, поэтому перемещение в сторону уменьшения длины пьезопакета будет меньшим. Излишняя нагрузка может привести к разрушению (отслаиванию пластин друг от друга). Также необходимо предусмотреть возможность термической стабилизации отражающей поверхности в случае использования зеркала для коррекции мощного лазерного излучения.

Основные характеристики зеркала и атмосферная турбулентность

Основной параметр турбулентной атмосферы – структурная постоянная C_n^2 [20]. Ее значения обычно изменяются от $10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$ (сильная турбулентность) до $10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ (слабая турбулентность). Этот параметр позволяет рассчитать радиус когерентности (радиус Фрида) – области, в которой изменение фазы составляет не более 1 рад [21]:

$$r_0 = 3,02(C_n^2 L k^2)^{-3/5}, \quad (1)$$

где L – длина горизонтальной трассы; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны.

Для оптимальной коррекции фазовых флуктуаций, вызванных атмосферной турбулентностью, нужно оценить необходимое число актюаторов зеркала. Для этого можно воспользоваться формулой [21]:

$$N = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2, \quad (2)$$

где D – диаметр выходной апертуры оптической системы; N – количество актюаторов.

При создании эффективной адаптивной оптической системы передачи лазерного излучения на расстояние необходимо учитывать следующее условие:

радиус когерентности должен быть больше, чем радиус первой зоны Френеля $r_0 > L\lambda^{1/2}$ [22]. Исходя из этого ограничения, для $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ (типичное значение для «умеренно сильной» турбулентности) на километровой горизонтальной трассе $r_0 = 33 \text{ мм}$ ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$). Следовательно, для компенсации атмосферных флуктуаций фазы светового пучка с апертурой, например, 400 мм, прошедшего слой турбулентной среды с вышеперечисленными параметрами, необходимо иметь 115–120 управляющих элементов. Однако деформируемое зеркало с апертурой 400 мм очень сложно изготовить, и оно будет обладать низкой частотой первого резонанса, что не позволит применять его в быстрых системах коррекции фазовых aberrаций. Именно поэтому адаптивные зеркала необходимо делать с небольшими апертурами и при этом использовать актюаторы малого размера (диаметра). Для использования зеркал с относительно малой апертурой сначала необходимо уменьшить диаметр лазерного пучка до размера корректора волнового фронта, а затем увеличить до размеров выходной апертуры формирующего телескопа.

Конструкция актюаторов и оценка их перемещения в составе зеркала

Разработанный нами актюатор представляет собой многослойный кольцевой пьезопакет длиной 10 мм с внешним диаметром 5 мм и диаметром внутреннего отверстия 2,5 мм, закрепленный между двумя толстыми пластинами при помощи стержня из пружинной стали. Изменяя натяжение стержня, можно регулировать предварительную механическую нагрузку для начального сжатия пьезопакета. В такой конструкции при удлинении пьезопакета его усилие будет направлено на деформацию как зеркальной подложки, так и стержня, а при сокращении растянутый стержень будет помогать тянуть зеркальную подложку. Хвостовик актюатора прикрепляется резьбовым соединением к толстому основанию, а наконечник диаметром 3 мм приклеивается к зеркальной подложке. Поверхность пьезопакета в свободном состоянии перемещается на 13 мкм при подаче управляющих напряжений в диапазоне от -20 до $+180 \text{ В}$.

При коррекции aberrаций излучения мощных лазерных установок необходимо обеспечить термостабилизацию поверхности зеркала на пьезоактюаторах. Поэтому в качестве подложки зеркала был выбран поликристаллический кремний, обладающий высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению с другими материалами подложек.

Были проведены предварительные численные оценки размеров и параметров пьезоактюаторов и рассчитаны параметры стержня. Блокирующая сила использованного пьезопакета (максимальная генерируемая пьезопакетом сила) составила 900 Н, поэтому сумма сил, необходимых для локальной деформации подложки на 7 мкм и растяжения стержня, должна составлять $\sim 50\%$ от блокирующей силы для обеспечения его надежной работы.

Значение силы F_s , которую необходимо приложить для растяжения стержня на величину x , можно вычислить по закону Гука [23]:

$$F_s = \xi x, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент жесткости стержня, который рассчитывается по формуле [23]:

$$\xi = \frac{E_{ст} S}{L_0}, \quad (4)$$

$E_{ст}$ – модуль Юнга стали; S – площадь поперечного сечения стержня; L_0 – длина стержня.

Для наших исследований был выбран стержень диаметром 2 мм, изготовленный из стали марки 60С2А с модулем Юнга 212 ГПа. Результаты расчетов зависимости силы, необходимой для растяжения стержня на 7 мкм от его длины, приведены на рис. 1, а.

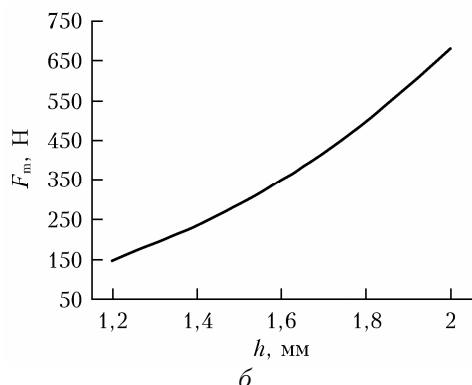
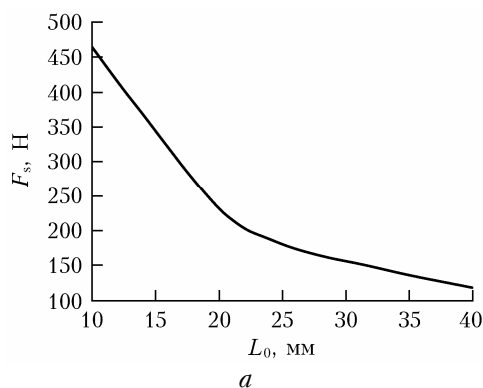


Рис. 1. Графики расчета параметров пьезоактюатора: а – зависимость силы, необходимой для растяжения стержня на 7 мкм, от его длины; б – зависимость силы, необходимой для изгиба подложки, от ее толщины

Силу, необходимую для прогиба поверхности подложки в области каждого актюатора, можно вычислить по формуле [24]:

$$F_m = \frac{4\pi E_{кр} h^3 \Delta_{max}}{3 d^2 (1 - \mu^2)}, \quad (5)$$

где $E_{кр}$ – модуль Юнга материала подложки (130,9 ГПа); h – толщина подложки; Δ_{max} – прогиб поверхности подложки (7 мкм); d – расстояние ме-

жду краями закрепления актюаторов; μ – коэффициент Пуассона (для кремния 0,28). С конструктивной точки зрения для пьезопакетов диаметром 5 мм расстояние между краями закрепления актюаторов (d) может составить не менее 10 мм. В этом случае диаметр всего адаптивного зеркала с 121 управляющим элементом, расположенным по гексагональной сетке, будет равен 120 мм. Результат расчетов зависимости силы, необходимой для изгиба подложки, от ее толщины (1,2 ÷ 2,0 мм) представлен на рис. 1, б.

Для нормальной работы актюатора необходимо, чтобы сумма сил $F_s + F_m$ была на 50% меньше блокирующей силы – 900 Н. Очевидно, что использование длинного стержня приводит к увеличению габаритов всей конструкции. Толщина зеркальной подложки должна быть оптимизирована, ведь если подложка будет тонкой, то при полировке будет сложно получить поверхность хорошего оптического качества. Следует отметить, что для тонкой подложки характерны «пропечатывания» актюаторов на поверхности зеркала (так называемый print-through эффект) в местах их крепления к подложке [25]. Таким образом, на основании проведенных расчетов и представленных выше графиков мы выбрали длину стержня 25 мм и толщину подложки 1,5 мм. При этом сумма сил, действующих на пьезопакет, составит 473 Н (сила, необходимая для перемещения оптической поверхности на 7 мкм, равна 287 Н, а для растяжения стержня длиной 25 мм на ту же величину – 186 Н).

Как было упомянуто во введении, одной из проблем при использовании деформируемого зеркала на пьезоактюаторах является замена пьезопакетов в случае их повреждения или пробоя. В конструкции нашего зеркала была предусмотрена такая возможность. Актюатор легко разбирается на отдельные элементы и выкручивается из толстого основания корректора, при этом наконечник пьезоактюатора вместе с стержнем остаются жестко приклеенными к подложке. Поэтому после замены поврежденного пьезопакета не требуется отклеивать зеркальную подложку. Более того, в случае необходимости поверхность зеркала в месте расположения актюатора можно корректировать изменением натяжения стержня.

Конструкция корректора волнового фронта с пьезоактюаторами

Мы изготовили и исследовали пьезоактюаторное зеркало диаметром 120 мм с гексагонально расположенным 121 пьезоактюатором. На полированную подложку было нанесено высокоотражающее многослойное диэлектрическое покрытие.

Процесс изготовления зеркала состоял из нескольких этапов.

1. Сборка актюаторов (на рис. 2, а приведен общий вид актюатора).

2. Регулировка натяжения стержня каждого актюатора путем измерения амплитуды перемещения

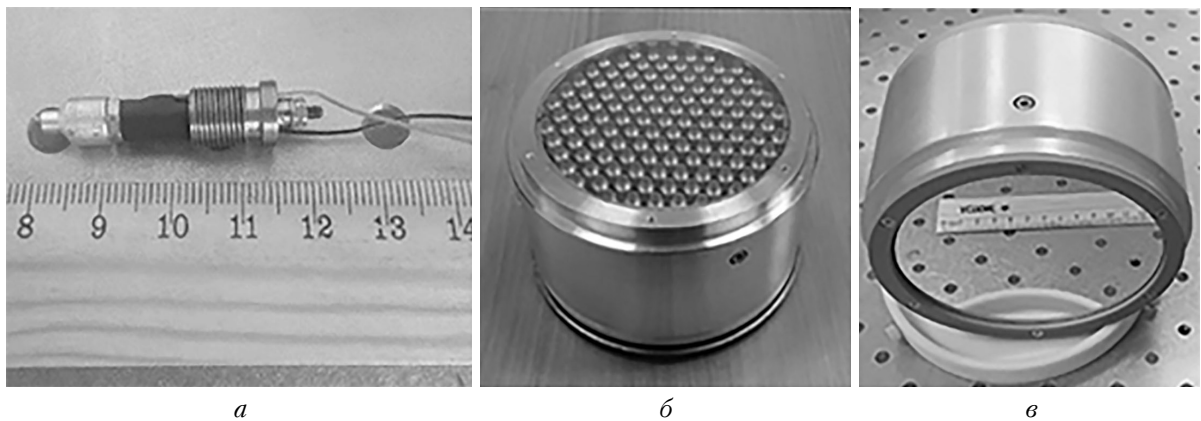


Рис. 2. Этапы сборки деформируемого зеркала на пьезоактюаторах: *а* – актюатор, общий вид; *б* – зеркало без отражающей подложки; *в* – зеркало с покрытием

всех актюаторов с использованием интерферометра Физо РИФ-100 (ООО «Активная оптика НайтН»): при удлинении пьезоактюатора происходит сдвиг интерферометрических полос, вследствие чего можно определить перемещение верхней поверхности пьезоактюатора в свободном состоянии для отбора пьезоактюаторов со схожими показателями удлинения (расстояние между двумя соседними полосами равно половине длины волны излучения интерферометра).

3. Монтаж актюаторов на основании.

4. Выравнивание торцевых поверхностей накопечников всех актюаторов механической шлифовкой.

5. Приклеивание подложки к наконечникам пьезоактюаторов.

6. Монтаж проводов в электрическом разъеме, установленном на задней крышке металлического корпуса зеркала.

7. Полировка поверхности подложки.

8. Напыление отражающего покрытия на поверхность подложки.

Общий вид зеркала представлен на рис. 2, *б*, *в*.

Параметры деформируемого зеркала на пьезоактюаторах

После изготовления деформируемого зеркала его основные характеристики были исследованы на диагностическом стенде (рис. 3). Он включает в себя источник излучения – диодный лазер 2 на $\lambda = 650$ нм мощностью 5 мВт, линзу 4 с фокусным расстоянием 500 мм, деформируемое зеркало 5, датчик волнового фронта типа Шака–Гартмана (ДВФ). ДВФ состоял из видеокамеры на базе КМОП 8, линзового раstra с фокусным расстоянием микролинз 5 мм и размером микролинз 120×120 мкм, уменьшающего телескопа 12,5 \times , включающего входную линзу 6 диаметром 50 мм с фокусным расстоянием 500 мм и выходную линзу 7 диаметром 25 мм с фокусным расстоянием 40 мм. После анализа волнового фронта на ДВФ, персональный компьютер 9 с программным обеспечением рассчитывает напряжения, необходимые для коррекции искаженного

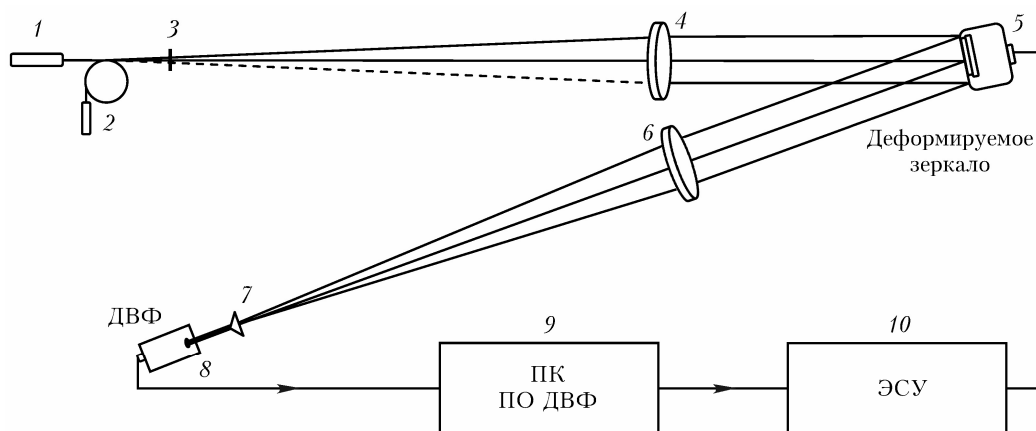


Рис. 3. Оптическая схема диагностического стенда: 1 – трассировочный лазер; 2 – диагностический лазер; 3 – диафрагма; 4 – коллимирующая линза; 5 – деформируемое зеркало; 6 – входной объектив уменьшающего телескопа; 7 – выходная линза телескопа; 8 – датчик волнового фронта; 9 – компьютер с программным обеспечением; 10 – электронная система управления (ЭСУ)

волнового фронта, которые подаются при помощи электронной системы управления (ЭСУ) 10 на разъем деформируемого зеркала. Для юстировки оптической системы использовался трассировочный диодный лазер 1 на $\lambda = 650$ нм с узким пучком. На диафрагме 3 выполнялось совмещение оптических осей расходящегося диагностического и трассировочного параллельного пучков лазерного излучения, чтобы при дальнейшем распространении излучение проходило через центры оптических элементов.

Измерения формы поверхности зеркала проводились с помощью ДВФ, поверхность зеркала представлялась в виде интерферограммы. Плоскостность начальной поверхности зеркала составила $P-V = 0,14$ мкм, СКО = 0,017 мкм (рис. 4, а). Для обеспечения симметричных деформаций поверхности зеркала ко всем управляющим элементам были приложены равные напряжения (+80 В) – так называемые напряжения смещения. Форма поверхности зеркала после подачи напряжений показана на рис. 4, б. Отклонение от плоскостности в этом случае составило $P-V = 0,74$ мкм. Это связано с разной чувствительностью отдельных актюаторов.

Функции отклика всех актюаторов зеркала также были измерены с помощью ДВФ и представлены в виде интерферограмм (рис. 5, а), которые отображают деформацию поверхности зеркала при подаче электрического напряжения +70 В на один актюатор.

После этого была проведена коррекция искажений поверхности зеркала методом фазового сопряжения [26]. В результате коррекции собственных aberrаций зеркала, которые появились после подачи напряжений смещения (рис. 4, б), отклонение поверхности от плоскости составило 0,05, СКО = 0,01 мкм. Максимальный разброс корректирующих напряжений был равен 17 В от напряжения смещения +80 В (рис. 4, в).

Для измерения частоты первого резонанса деформируемого зеркала на актюатор № 1, расположен-

ный в центральной части зеркала, от генератора звуковых колебаний подавалось синусоидальное напряжение в частотном диапазоне от 0,1 до 22 кГц. По причине прямого пьезоэффекта на соседнем актюаторе № 2 индуцировалось переменное напряжение, регистрируемое осциллографом. При резонансе сдвиг фаз между сигналами с генератора и соседнего актюатора составляет 90° , также наблюдается максимальная амплитуда напряжения отклика. Первый резонанс колебаний деформируемого зеркала был определен на частоте 18,5 кГц (рис. 5, б).

Также был измерен максимальный прогиб поверхности зеркала под действием управляющего актюатора. Например, при подаче на актюатор № 1, напряжения +100 В относительно напряжения смещения (+80 В) прогиб поверхности составил 3,6 мкм (на рис. 5, в приведена интерферограмма поверхности в области локализации актюатора радиусом ~ 15 мм). При приложении аналогичного напряжения, но отрицательного знака, прогиб составил 3,4 мкм (рис. 5, г). Таким образом, максимальное локальное перемещение отражающей поверхности равно 7 мкм. Были получены результаты по деформации поверхности при подаче одинаковых по модулю напряжений 100 В, но противоположных знаков, на соседние актюаторы № 1 и № 7 (на рис. 5, д прогиб поверхности представлен на апертуре диаметром ~ 40 мм). Результирующая величина деформации оказалась почти в 2 раза меньше максимальной деформации для одного актюатора и составила ~ 3,4 мкм.

Охлаждение зеркальной подложки

При установке деформируемого зеркала в мощных лазерных системах необходимо обеспечить термостабилизацию его поверхности. В [27] эта задача решалась путем создания вафельной структуры охлаждения внутри тонкой зеркальной подложки.

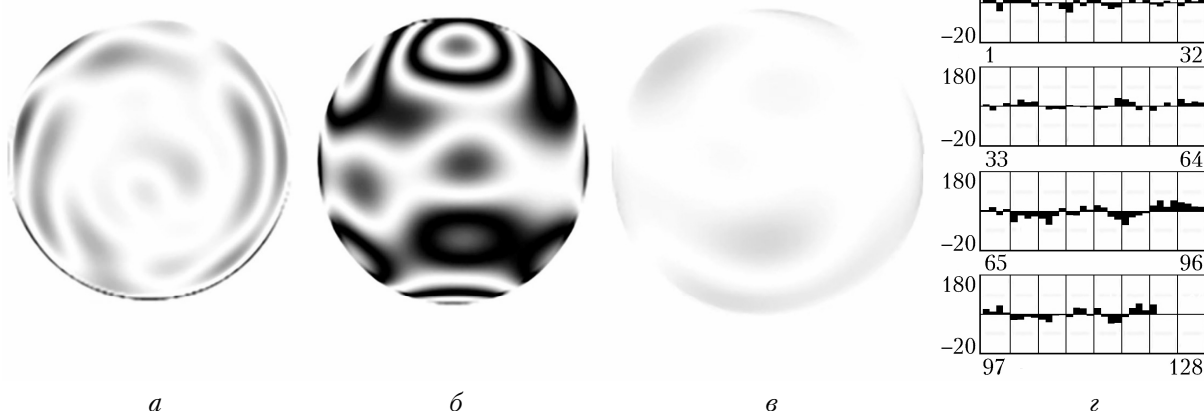


Рис. 4. Поверхность зеркала: а – начальная поверхность ($P-V = 0,14$ мкм, СКО = 0,017 мкм); б – поверхность зеркала с напряжениями смещения +80 В на всех актюаторах ($P-V = 0,74$ мкм, СКО = 0,1 мкм); в – результат коррекции начальных искажений зеркальной поверхности ($P-V = 0,05$ мкм, СКО = 0,01 мкм); г – карта напряжений на актюаторах (по оси абсцисс – номер актюатора)

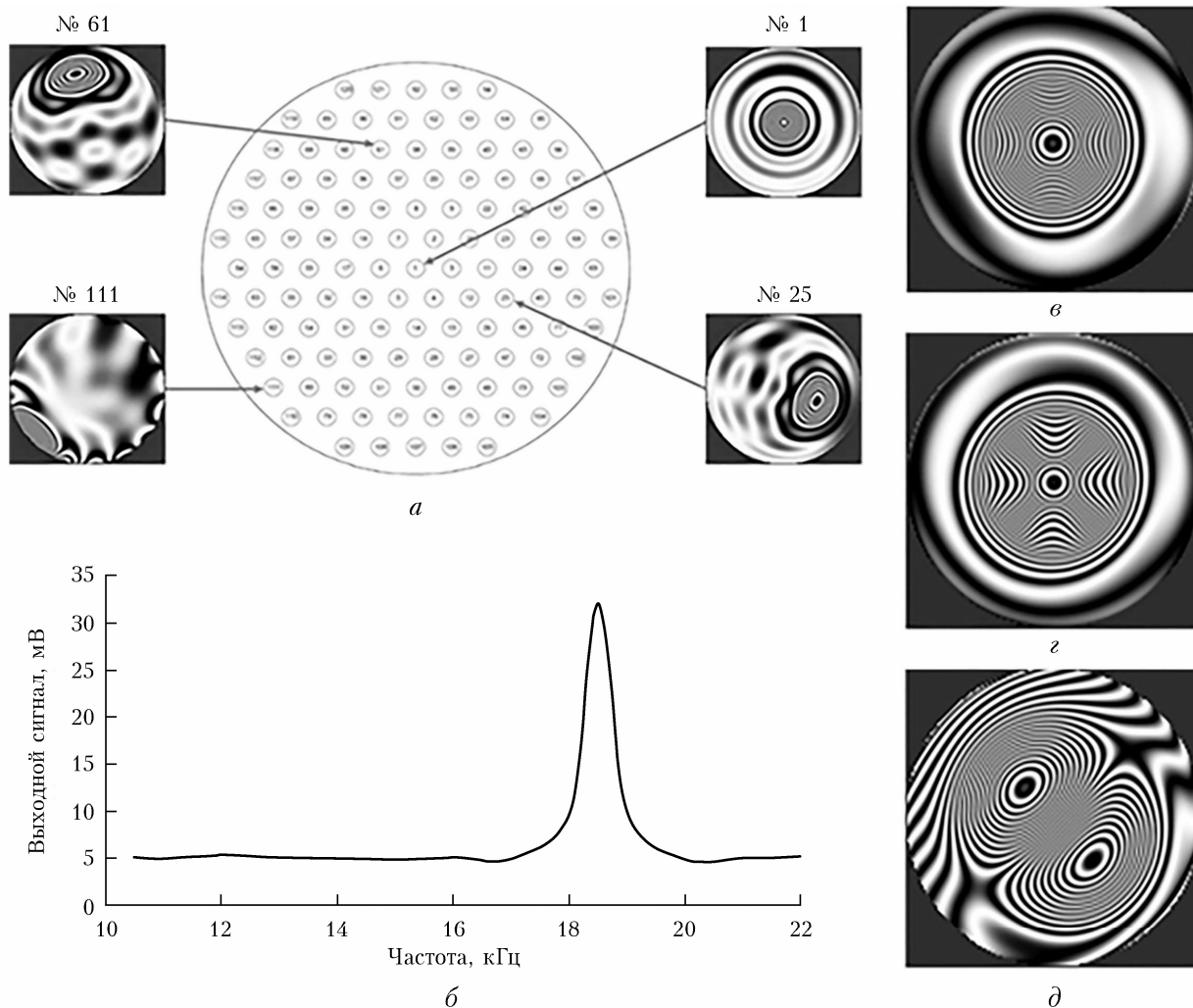


Рис. 5. Основные параметры зеркала: *a* – функции отклика актюаторов № 1, 25, 61 и 111; *б* – амплитудно-частотная характеристика зеркала; *в* – перемещение актюатора № 1 при +100 В (3,6 мкм); *г* – перемещение актюатора № 1 при –100 В (3,4 мкм); *д* – деформация поверхности зеркала при подаче одинаковых по модулю напряжений на соседние актюаторы № 1 и 7 (напряжения на актюаторе № 1 +100 В, на актюаторе № 7 –100 В)

Мы предлагаем термостабилизацию поверхности зеркала путем отвода тепла от тыльной поверхности кремниевой пластины с высоким коэффициентом теплопроводности через стержни, стягивающие пьезоупаковки в актюаторах. Для этого должна поддерживаться постоянная температура (+20°) основания зеркала (толстая латунная пластина, к которой крепятся актюаторы). Испытания такого зеркала были проведены на волоконном иттербиевом лазере компании IPG мощностью 1,5 кВт. Одномодовый лазерный пучок с длиной волны 1,03 мкм диаметром 10 мм направлялся на поверхность корректора волнового фронта. Одновременно при помощи гартманометра HION-100 [28] проводилось измерение (наблюдение) искажения поверхности зеркала под действием лазерного излучения. Такие измерения показали, что при плотности мощности 1900 Вт/см² температурные деформации поверхности зеркала практически отсутствуют (СКО – 0,01 мкм). Дан-

ный корректор волнового фронта применяется компанией Doosan, Корея.

Заключение

Было разработано и исследовано деформированное зеркало на пьезоактюаторах для компенсации искажений мощного лазерного излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере. Параметры зеркала оптимизированы для работы в следующих условиях: $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$, длина горизонтальной трассы 1 км, длина волны излучения 1,03 мкм. Управление зеркалом осуществлялось в 121 точке, расположенной гексагонально актюаторами, расстояние между которыми 10 мм; диаметр зеркала – 120 мм.

В выбранной конструкции максимальный прогиб отражающей поверхности под воздействием актюатора был не менее 7 мкм, что позволяет коррек-

тировать крупномасштабные и мелкомасштабные аберрации волнового фронта с амплитудой до 14 мкм. Частота первого резонанса, равная 18,5 кГц, обеспечивает работу адаптивной системы в килогерцовом диапазоне.

Основные преимущества такой конструкции зеркала: возможность замены поврежденных пьезо-керамических пакетов, использование корректора для компенсации быстроменяющихся мелкомасштабных аберраций световых пучков, а также термостабилизация и охлаждение зеркальной подложки через корпус актюаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 19-19-00706 (расчет актюаторов), № 20-69-46064 (исследование термодформаций зеркала), № 20-19-00597 (исследование основных характеристик корректора).

1. Salter P.S., Booth M.J. Adaptive optics in laser processing // *Light Sci. Appl.* 2019. V. 8. P. 110.
2. Xu L., Wu Y., Du Y., Wang D., An X., Li M., Zhou T., Shang J., Wang J., Liu Z., Ou L., Zhao N., Xiang R., Tong L., Lin H., Gao Q., Lu Y., Zhang K., Tang C. High brightness laser based on Yb:YAG MOPA chain and adaptive optics system at room temperature // *Opt. Express*. 2018. V. 26. P. 14592–14600.
3. Канев Ф.Ю., Цыро Е.И. Восстановление трехмерного распределения показателя преломления атмосферы на основе методов адаптивной оптики // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. Т. 23, № 5. С. 398–404; Kanev F.Yu., Tsyro E.I. Reconstruction of the three-dimensional refractive index distribution by means of adaptive optics // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 5. P. 426–432.
4. Pilar J., Slezak O., Sikocinski P., Divoky M., Sawicka M., Bonora S., Lucianetti A., Mocek T., Jelinkova H. Design and optimization of an adaptive optics system for a high-average-power multi-slab laser (HiLASE) // *Appl. Opt.* 2014. V. 53. P. 3255–3261.
5. Лылова А., Шелдакова Ю., Кудряшов А., Самаркин В. Формирование кольцевого и супергауссова распределений интенсивности лазерного излучения в дальней зоне с использованием биморфного зеркала // *Квант. электрон.* 2018. Т. 48, № 1. С. 57–61.
6. Kudryashov A., Alexandrov A., Rukosuev A., Samarkin V., Galarneau P., Turbide S., Cheteauneuf F. Extremely high-power CO₂ laser beam correction // *Appl. Opt.* 2015 V. 54, N 14. P. 4352–4358.
7. Wattellier B., Fuchs J., Zou J.-P., Kudryashov A., Aleksandrov A. Generation of a single hot spot by use of a deformable mirror and study of its propagation in an underdense plasma // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2003. V. 20, N 8. P. 1632–1642.
8. Akahane Yu., Ma J., Fukuda Yu., Aoyama M., Kiriya H., Sheldakova J., Kudryashov A., Yamakawa K. Characterization of wave-front corrected 100 TW, 10 Hz laser pulses with peak intensities greater than 1020 W/cm² // *Rev. Sci. Instrum.* 2006. V. 77, N 2. P. 023102.
9. Ботыгина Н.Н., Колобов Д.Ю., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Чупраков С.А., Шиховцев А.Ю. Двухзеркальная адаптивная система коррекции атмосферных помех Большого солнечного вакуумного телескопа // *Оптика атмосфер. и океана*. 2018. Т. 31, № 7. С. 563–569; Botygina N.N., Kolobov D.Yu., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Shikhovtsev A.Yu. Two-

- mirror adaptive system for correction of atmospheric disturbances of the large solar vacuum telescope // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 709–717.
10. Рукосуев А.Л., Кудряшов А.В., Лылова А.Н., Самаркин В.В., Шелдакова Ю.В. Адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта в реальном времени // *Оптика атмосфер. и океана*. 2015. Т. 28, № 2. С. 189–195; Rukosuev A.L., Kudryashov A.V., Lylova A.N., Samarkin V.V., Sheldakova Yu.V. Adaptive optics system for real-time wavefront correction // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 4. P. 381–386.
11. Barwick S. Least-squares estimation for hybrid curvature wavefront sensors // *Opt. Commun.* 2011. V. 284, N 8. P. 2099–2108.
12. Akondi V., Castillo S., Vohnsen B. Digital pyramid wavefront sensor with tunable modulation // *Opt. Express*. 2013. V. 21, N 15. P. 18261–18272.
13. Александров А.Г., Завалова В.Е., Кудряшов А.В., Рукосуев А.Л., Шелдакова Ю.В., Самаркин В.В., Романов П.Н. Датчик волнового фронта Шака–Гартмана для измерения параметров мощных импульсных твердотельных лазеров // *Квант. электрон.* 2010. Т. 40, № 4. С. 321–326.
14. Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Коняев П.А., Фортес Б.В. Численная модель адаптивной оптической системы. Часть 2. Датчики волнового фронта и исполнительные элементы // *Оптика атмосфер. и океана*. 1995. Т. 8, № 3. С. 419–428.
15. Toporovskiy V., Kudryashov A., Samarkin V., Sheldakova J., Rukosuev A., Skvortsov A., Pshonkin D. Bimorph deformable mirror with a high density of electrodes to correct for atmospheric distortions // *Appl. Opt.* 2019. V. 58, N 22. P. 6019–6026.
16. Rausch P., Verpoort S., Wittrock U. Unimorph deformable mirror for space telescopes: Design and manufacturing // *Opt. Express*. 2015. V. 23, N 15. P. 19469–19477.
17. Sinquin J.C., Lurcon J.M., Guilemard C. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS // *Proc. SPIE*. 2008. V. 7015. P. 70150O1.
18. Freeman R.H., Garcia H.R. High-speed deformable mirror system // *Appl. Opt.* 1982. V. 21, N 4. P. 589–595.
19. Панич А.Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
20. Болбасова Л.А., Лукин В.П. Аналитические модели высотной зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы для задач адаптивной оптики // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 11. С. 918–925.
21. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
22. Lukin V.P. Efficiency of some correction systems // *Opt. Lett.* 1979. V. 4, N 1. P. 15–17.
23. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
24. Young W.C., Budynas R.G., Sadegh A.M. Roark's Formulas for Stress and Strain, Eighth Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012. 1072 p.
25. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012. 200 с.
26. Шелдакова Ю.В., Кудряшов А.В., Рукосуев А.Л., Черезова Т.Ю. Использование гибридного алгоритма управления биморфным зеркалом для фокусировки

- светового излучения // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 380–383.
27. *Ahn K., Yang H.S., Rhee H.G., Kihm H.* CVD SiC deformable mirror with monolithic cooling channels // Opt. Express. 2018. V. 26, N 8. P. 9724–9739.
28. *Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A., Borsoni G., Denisov D., Karasik V., Sakharov A.* A device based on the Shack–Hartmann wave front sensor for testing wide aperture optics // Proc. SPIE. 2015. V. 9754. P. 97540K.

V.V. Toporovsky, A.V. Kudryashov, V.V. Samarkin, A.L. Rukosuev, A.N. Nikitin, Yu.V. Sheldakova, O.V. Otrubyannikova. **Cooled stacked-actuator deformable mirror for compensation of phase fluctuations in a turbulent atmosphere.**

To compensate for aberration of laser radiation passed through a turbulent atmosphere, a wavefront corrector was designed in the form of a cooled stacked-actuator deformable mirror. In this work, theoretical estimations which allow one to determine main characteristics of this mirror are represented. The method suggested for cooling the reflecting surface of the wavefront corrector developed through piezoactuators body is experimentally studied. The results of measurements of main characteristics of the deformable mirror are shown, including the initial mirror surface shape, response functions of actuators, stroke of the mirror, and first resonance response of the mirror surface.