

ЗЕРКАЛО НА ПЬЕЗОАКТЮАТОРАХ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АБЕРРАЦИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СКВОЗЬ ТУРБУЛЕНТНУЮ АТМОСФЕРУ

***В.В. Топоровский¹, А.В. Кудряшов², В.В. Самаркин²,
А.Л. Рукосуев², А.Н. Никитин²***

¹Московский политехнический университет

²ИДГ РАН

Разработан корректор волнового фронта – деформируемое зеркало на пьезоактюаторах, позволяющее компенсировать в реальном времени aberrации мощного лазерного излучения, проходящего сквозь турбулентную атмосферную среду. В данной работе описаны параметры турбулентности, при которых возможно применение подобного зеркала. В конструкции зеркала имеется возможность замены поврежденных в процессе эксплуатации пьезоактюаторов, а также охлаждения зеркальной подложки через управляющие элементы. Рассмотрены основные характеристики деформируемого зеркала: форма начальной поверхности, функции отклика актюаторов, их максимальное перемещение и взаимное влияние, а также частотный диапазон управления.

Введение

Большинство оптико-электронных систем работают в атмосферной среде, где основными искажающими факторами, помимо поглощения и рассеяния света, являются случайные неоднородности показателя преломления – атмосферная турбулентность [Лукин, 2014]. Результатом решения этой проблемы может являться увеличение интенсивности излучения в плоскости фокусировки. Для этой цели могут применяться методы и средства адаптивной оптики (АО), позволяющие компенсировать искаженный волновой фронт светового излучения в реальном времени.

АО широко применяется в области медицины [Babcock, 1953], микроскопии [Roorda, 2007], в задачах передачи светового излучения на длинные дистанции [Biss et al., 2007], коррекция искажений волнового фронта в мощных лазерных системах [Samarkin et al., 2016] и т.д. Ключевым элементом адаптивной оптической системы (АОС) является корректор волнового фронта. В зависимости от области применения можно выделить несколько типов корректоров. В области медицины и микроскопии используются MEMS-зеркала [Bifano, 2011; Bifano et al., 1999] и ЖК-модуляторы [Daniel et al., 2016], обладающие высоким пространственным разрешением управляющих элементов. В работе с мощным лазерным излучением наиболее эффективная коррекция искаженного волнового фронта достигается при помощи зеркал биморфного типа [Kudryashov et al., 2015], так как они просты в изготовлении, обладают высокой надежностью и хорошо воспроизводят крупномасштабные aberrации волнового фронта с помощью малого количества управляю-

щих электродов. Биморфные зеркала также успешно применяются в сверхмощных импульсных лазерах для компенсации тепловых aberrаций активных элементов [Александров и др., 2005].

Для компенсации турбулентных флуктуаций фазы, вышеперечисленные корректоры волнового фронта не подходят по ряду причин. MEMS-зеркала имеют ограниченный прогиб отражающей поверхности, что делает невозможным компенсации больших по амплитуде крупномасштабных aberrаций. Такие зеркала имеют сравнительно малые апертуры и лучевую стойкость, что не дает возможности управлять мощными непрерывными лазерными пучками [Bifano et al., 1999]. ЖК-модулятор обладает нелинейностью отклика на управляющее напряжение и низким быстродействием [Daniel et al., 2016]. При использовании биморфных деформируемых зеркал возникает проблема воспроизведения мелкомасштабных aberrаций [Kudryashov et al., 2015], хотя для решения этой задачи уже ведутся исследования [Toporovskiy et al., 2018]. Деформируемые зеркала на пьезоактюаторах (ДЗП) имеют высокое быстродействие, плотную упаковку актюаторов и позволяют воспроизводить мелкомасштабные aberrации волнового фронта высоких порядков. Поэтому, с нашей точки зрения, они являются наиболее подходящими для компенсации aberrаций мощного лазерного излучения, прошедшего сквозь турбулентную атмосферную среду [Wlodarczyk et al., 2014; Xue et al., 2013].

Деформируемое зеркало на пьезоактюаторах

Традиционное ДЗП состоит из толстого плоского основания, многослойных пьезоактюаторов (пьезопакетов) и тонкой стеклянной пластины с отражающим диэлектрическим покрытием с высоким коэффициентом отражения (рис. 1). ДЗП установлено в металлическом корпусе. На задней пластине корпуса установлен электрический разъем для подключения электронного блока управления зеркалом. При подаче электрического напряжения на пьезоактюатор его длина изменяется (увеличивается или уменьшается в зависимости от знака поданного на него напряжения). Перемещение (растяжение или сжатие) пьезоактюатора $\Delta l = d_{33}El_0$ происходит вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта при наличии электрического поля E поперек тонкой пьезокерамической пластины, где d_{33} – «толщинный»

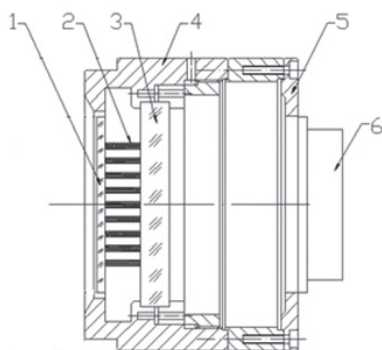


Рис. 1. Схема традиционного ДЗП: 1 – отражающая пластина, 2 – пьезоактюаторы, 3 – толстое основание, 4 – металлический корпус (оправа), 5 – задняя крышка, 6 – электрический разъем

пьезомодуль пьезокерамического материала, l_0 – толщина (длина) пьезокерамического элемента. Это растяжение приводит к деформации отражающей пластины в месте расположения пьезоактюатора. При подаче на пьезоактюаторы набора различных напряжений можно формировать произвольную форму поверхности зеркала.

В конструкции ДЗП имеется два важных недостатка:

невозможность замены пьезопакетов в случае их повреждения и отсутствие термостабилизации зеркала [Dixit et al., 2014], что требуется при использовании зеркала для компенсации aberrаций мощного лазерного излучения.

Атмосферная турбулентность и основные характеристики зеркала

Основным параметром турбулентной атмосферы является структурная функция показателя преломления C_n^2 , величина которой для сильной турбулентности на горизонтальной трассе составляет $\sim 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$. Данный параметр используется для определения радиуса Фрида, который рассчитывается по формуле [Fried, 1982]:

$$r_0 = 3.02(C_n^2 L k^2)^{-3/5} \quad (1)$$

где C_n^2 – структурная функция показателя преломления, L – длина горизонтальной трассы, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число ($\lambda = 632.8 \text{ нм}$).

Для определения количества управляющих элементов, необходимых для компенсации заданной турбулентности можно воспользоваться следующей формулой [Tyson, 2011]:

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

где N – количество актюаторов, D – диаметр апертуры, r_0 – радиус Фрида.

Для $C_n^2 = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ на длине горизонтальной трассы в 1.5 км величина радиуса Фрида равняется 9.7 мм. Соответственно, для компенсации атмосферных флуктуаций фазы в турбулентной среде с вышеперечисленными параметрами необходимо иметь 121 актюатор. При гексагональном расположении этих актюаторов на апертуре диаметром 120 мм расстояния между их центрами будут равны 10 мм.

Конструкция актюаторов и оценка их перемещения в составе зеркала

Как отмечалось ранее, одним из существенных недостатков традиционных ДЗП является невозможность их замены в случае выхода из строя, например, пробоя пьезокерамики. Это приводит к необходимости замены всего корректора. Нами предложена конструкция пьезоактюатора, позволяющая заменить его в уже собранном зеркале, не внося серьёзных искажений в начальную поверхность деформируемого зеркала.

Пьезоактюатор представляет собой пьезопакет длиной 10 мм с внешним диаметром 5 мм и внутренним отверстием с диаметром 2.5 мм, закреплённый между наконечником и втулкой при помощи проволочного стержня из пружинной стали. Изменяя натяжение проволоки, можно регулировать предварительную нагрузку для сжатия пьезопакета. Это необходимо для того, чтобы для деформации поверхности зеркала в обе стороны от начальной формы пьезопакет под внешней механической нагрузкой мог как расширяться, так и сжиматься. Локальное перемещение пьезопакета при приложении электрического напряжения 150 В было равно 10 мкм. Рабочий диапазон напряжений, который прикладывался к данному актюатору, составлял от -20 до $+180 \text{ В}$. Со стороны втулки актюатор крепился резьбовым соединением к толстому основанию, а наконечник приклеивался к тонкой стеклянной подложке.

Нами были проведены предварительные численные оценки, определяющие размеры и параметры пьезоактюаторов и подобрана марка пружинной стали. Блокирующая сила актюатора размером $\varnothing 5/\varnothing 2.5/10$ мм составляла 700 Н, поэтому сумма сил, необходимых для локальной деформации стеклянной подложки толщиной 2 мм на 10 мкм и растяжения пружинного стержня на такую же длину, не должна превысить это значение.

Значение силы упругости, необходимое для растяжения стержня на расстояние 10 мкм можно вычислить по закону Гука [Ландау, Е.М. Лифшиц, 1953]: $F = kx$, где F – сила, k – коэффициент жесткости, x – растяжение стержня. При этом коэффициент жесткости стержня k рассчитывается по формуле [Ландау, Е.М. Лифшиц, 1953]

$$k = \frac{ES}{L_0}$$

где E – модуль Юнга, S – площадь поперечного сечения стержня, L_0 – длина стержня.

Для наших исследований была выбрана проволока с диаметром 2 мм, изготовленная из стали марки 60С2А с модулем Юнга 212 ГПа. Результаты расчетов в зависимости приложенной силы от длины использованной проволоки представлены на рис. 2, а.

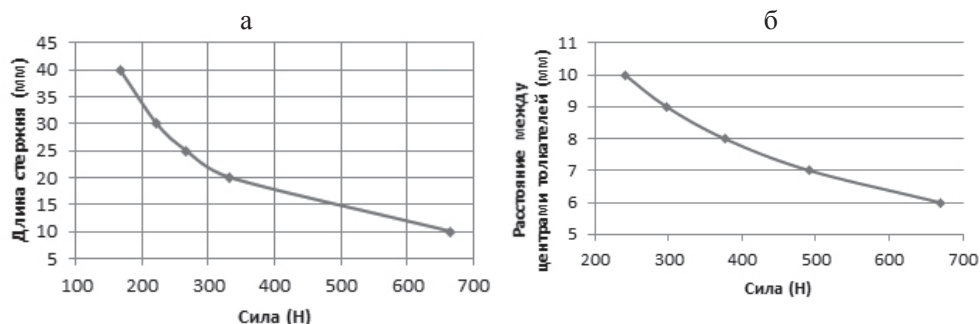


Рис. 2. Графики расчета параметров пьезопакета и пружинной стали: (а) – зависимость прикладываемой силы от длины стержня (слева); (б) – зависимость приложенной силы от расстояний между центрами толкателей (справа)

Затем определяем усилие, создаваемое пьезоактюатором, для прогиба поверхности стеклянной подложки в области каждого актюатора. Воспользуемся формулой [Tyson, 2011]:

$$F = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{E_{\text{ст}} h^3 \Delta_{\text{max}}}{d^2 (1 - \mu^2)},$$

где $E_{\text{ст}}$ – модуль Юнга стекла (69.3 ГПа), h – толщина подложки зеркала, Δ_{max} – прогиб поверхности подложки (10 мкм), d – расстояние между актюаторами, μ – коэффициент Пуассона (для стекла 0.19).

Результаты расчетов зависимости приложенной силы от расстояний между центрами актюаторов (5÷11 мм) представлены на рис. 2, б.

Мы определили размеры пружинного стержня для подобного пьезоактюатора, который может быть использован в зеркале на актюаторах с толщиной стеклянной подложки 2 мм. Сумма сил оказалась равной 507 Н, что соответствует расстоянию между актюаторами в 10 мм и длине стержня 25 мм (сила, необходимая для пере-

мещения оптической поверхности на расстояние 10 мкм – 241 Н, а для растяжения стержня длиной 25 мм на ту же длину – 266 Н).

Конструкция корректора волнового фронта с пьезоактюаторами

Для компенсации турбулентных флуктуаций фазы с $C_n^2 = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ ДЗП должно иметь 121 управляющий элемент (актюатор). По нашим расчетам, между центрами актюаторов расстояние должно быть 10 мм, то есть при их гексагональном расположении общий диаметр зеркала будет составлять порядка 120 мм. Общий вид зеркала представлен на рис. 3, а,б. На полированную стеклянную подложку толщиной 2 мм, было нанесено многослойное диэлектрическое высокоотражающее покрытие.

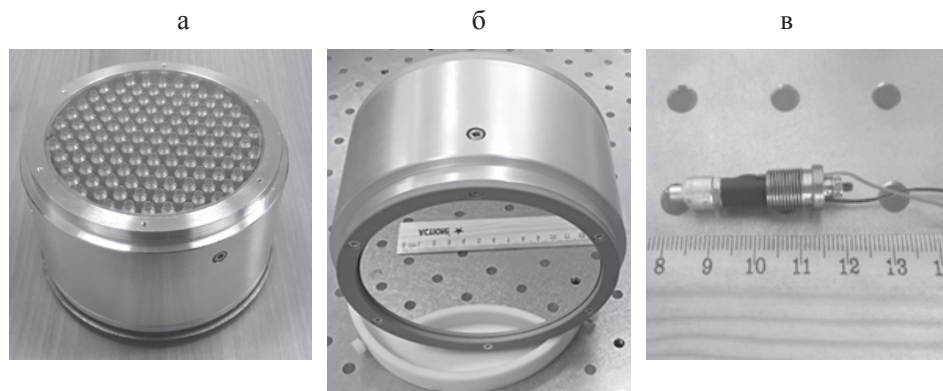


Рис. 3. Фотографии ДЗП: а – без покрытия, б – с покрытием, в – фотография пьезоактюатора в сборе

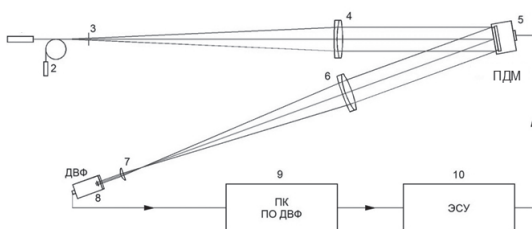
Процесс изготовления ДЗП включал нескольких этапов: 1) сборка пьезоактюаторов из составляющих пьезопакета наконечника, пружинного стержня, втулки для крепления к толстому основанию зеркала и гайки для создания и регулировки предварительного механического натяжения пружинного стержня и, соответственно, пьезопакета (на рис. 3, в представлен общий вид актюатора); 2) регулировкой натяжения стержня амплитуды перемещения выравнивались для каждого актюатора в отдельности с использованием интерферометра Физо; 3) монтаж актюаторов на основании; 4) выравнивание торцевых поверхностей наконечников всех актюаторов механической шлифовкой; 5) приклеивание тонкой стеклянной подложки к наконечникам пьезоактюаторов; 6) электрический монтаж проводов всех актюаторов в электрическом разъеме, установленном на задней крышке металлического корпуса зеркала; 7) полировка поверхности стеклянной подложки; 8) напыление отражающего покрытия на поверхность подложки. Основными достоинствами данной конструкции ДЗП являются: возможность компенсировать значительные по амплитуде крупномасштабные и мелкомасштабные aberrации волнового фронта, возможность замены пьезопакета в случае его повреждения, а также возможность охлаждения зеркальной подложки через управляющие актюаторы при условии термостабилизации толстого основания, на котором установлены актюаторы.

Параметры деформируемого зеркала на пьезоактюаторах

После изготовления ДЗП были исследованы его основные характеристики. Для этого был создан диагностический стенд, представляющий собой адаптивную

оптическую систему (АОС). Оптическая схема такого стенда показана на рис. 4. АОС состоит из источника излучения – диодного лазера с волоконным выводом с длиной волны 650 нм и мощностью 5 мВт (2), линзы с фокусным расстоянием 500 мм (4), деформируемого зеркала ДЗП (5), датчика волнового фронта типа Шака-Гартмана (ДВФ). ДВФ состоит из КМОП видеокамеры (8), линзового раstra с фокусным расстоянием микролинз 5 мм, размером микролинз 120x120 мкм, уменьшающего телескопа с увеличением 12.5X, включающего входную линзу диаметром 50 мм (6) с фокусным расстоянием 500 мм и выходную линзу диаметром 25 мм (7) с фокусным расстоянием 40 мм. Для юстировки оптической системы использовался трассировочный диодный лазер с узким параллельным пучком на длине волны 650 нм (1). На диафрагме (3) выполнялось совмещение оптических осей расходящегося диагностического (2) и трассировочного параллельного (1) пучков лазерного излучения, чтобы при дальнейшем распространении излучение также проходило через центры оптических элементов.

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



Начальная поверхность зеркала представлена в виде интерферограммы на рис. 5, а, полученной с помощью ДВФ. Аберрации начальной поверхности зеркала составили $P-V = 0.27$ мкм, $RMS = 0.034$ мкм. Чтобы иметь возможность деформировать поверхность зеркала не только в положительном направлении (толкать зеркальную поверхность), но и в противоположном (то есть тянуть зеркало), были приложены ко всем актюаторам равные напряжения (+80 В), так называемые BIOS-напряжения. Форма поверхности зеркала после подачи напряжений показана на рис. 5, б. Отклонение от плоскостности в этом случае составило $P-V = 1.47$ мкм. Это связано с разной чувствительностью отдельных пьезопакетов.

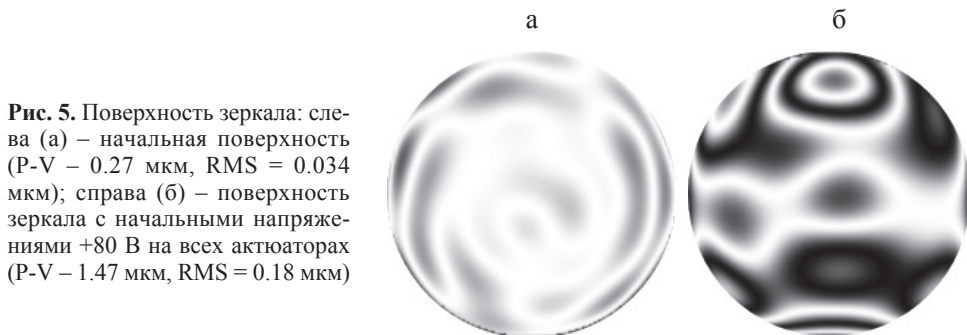


Рис. 5. Поверхность зеркала: слева (а) – начальная поверхность ($P-V = 0.27$ мкм, $RMS = 0.034$ мкм); справа (б) – поверхность зеркала с начальными напряжениями +80 В на всех актюаторах ($P-V = 1.47$ мкм, $RMS = 0.18$ мкм)

Функции отклика всех актюаторов ДЗП были измерены на диагностическом стенде при помощи ДВФ. Функции отклика представлены в виде интерферограмм, некоторые из которых показаны на рис. 6. Данные картины отображают деформацию поверхности зеркала при подаче электрического напряжения +70 В на один актюатор. При измерениях начальная поверхность зеркала вычиталась из результирующей.

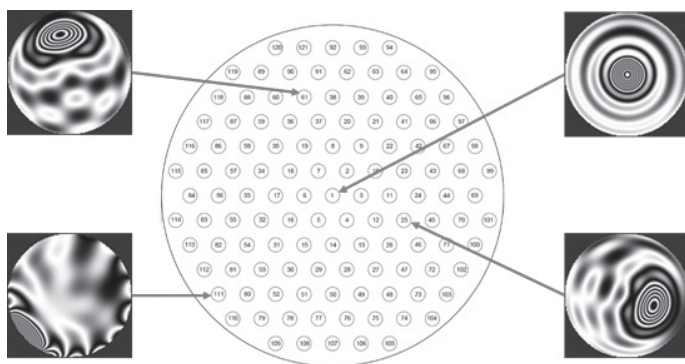


Рис. 6. Функции отклика 1, 25, 61 и 111-го актюаторов

После этого была проведена коррекция искажений поверхности зеркала с использованием метода фазового сопряжения [Кудряшов и др., 2012]. В результате коррекции удалось уменьшить аберрации зеркала, которые появились после подачи BIOS напряжений. Отклонение от плоскостности составило 0.01 мкм (P-V) и 0.019 мкм (RMS). На рис. 7 представлен результат коррекции искажений с приложенными напряжениями. Максимальный разброс напряжений составлял 17 В от начального напряжения +80 В.

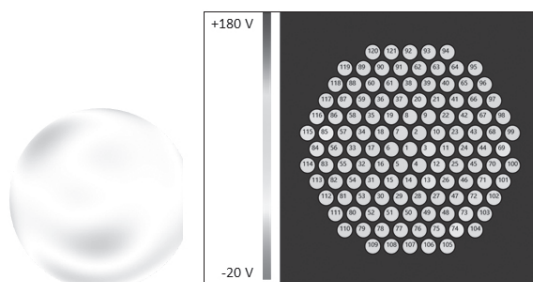


Рис. 7. Коррекция искажений зеркальной поверхности (P-V – 0.1 мкм, RMS = 0.019 мкм) с приложенными напряжениями

Была измерена максимальная деформация поверхности зеркала под действием каждого актюатора. На рис. 8, а,б представлены результаты деформации поверхности для первого актюатора. При подаче напряжения +90 В на первый актюатор относительно BIOS (+80 В) деформация поверхности была равна 5.7 мкм (P-V). При приложении того же напряжения, но с отрицательным знаком, деформация составила – 7.3 мкм (P-V). Максимальное перемещение поверхности актюатора было 13 мкм. Были получены результаты по деформации поверхности зеркала при подаче одинаковых по модулю напряжений 80 В, но противоположных знаков, на соседние актюаторы №№ 1 и 7 (рис. 8, в). Величина деформации оказалась почти в 2 раза меньше максимальной деформации для одного актюатора и составила около 7 мкм.

Была измерена частота первого резонанса данного зеркала. Для этого на актюатор № 2 с генератора звуковых сигналов подавалось синусоидальное напряжение в частотном диапазоне частот от 0.1 до 24 кГц. Это вызывало колебание поверхности зеркала, которое регистрировалось соседним актюатором № 3. Частотой первого резонанса считается частота, при которой разность фаз генерируемого сигнала и собственного колебания зеркала составляет 90°. Первый резонанс собственных

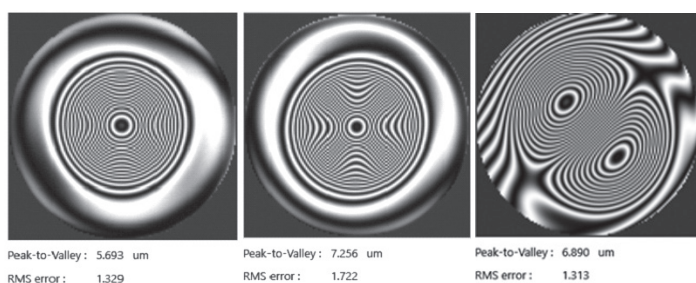


Рис. 8. Максимальное перемещение актюатора № 1: а – приложенные напряжения +90 В (P-V – 5.7 мкм, RMS = 1.33 мкм); б – -90 В (P-V – 7.26 мкм, RMS = 1.72 мкм); в – деформация поверхности зеркала при подаче одинаковых по модулю напряжений на соседние актюаторы №№ 1 и 7 (напряжения на актюаторах № 1 – +160 В, №7 – 0 В)

колебаний деформируемого зеркала был определен на частоте 18.5 кГц, при котором также наблюдалась максимальная амплитуда генерируемого сигнала (рис. 9).

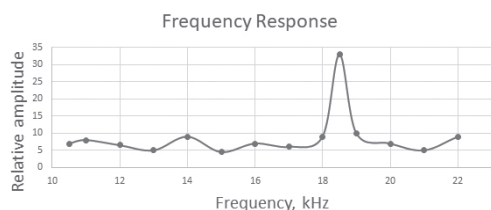


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика зеркала

Заключение

Было разработано деформируемое зеркало на пьезоактюаторах для компенсации мощного лазерного излучения, прошедшего сквозь турбулентную атмосферную среду. Это зеркало предназначено для коррекции фазовых флуктуаций, характерных атмосферной

турбулентности со следующими параметрами: $C_n^2 = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ на длине горизонтальной трассы 1.5 км, радиус Фрида составляет 9.7 мм для длины волны 632.8 нм.

Изготовлено и исследовано деформируемое зеркало с диаметром 120 мм, количеством актюаторов 121 с гексагональным расположением, расстоянием между актюаторами 10 мм. Максимальное перемещение поверхности зеркала под воздействием пьезоактюатора составляло ~ 13 мкм, что дает возможность корректировать крупномасштабные aberrации вплоть до 13 мкм. Частота первого резонанса такого зеркала составляла 18.5 кГц, что позволяет управлять таким зеркалом в АОС в килогерцовом диапазоне.

Основными преимуществами данной конструкции зеркала являются возможность компенсации быстроменяющихся мелкомасштабных aberrаций, возможность замены поврежденных пьезокерамических пакетов, а также возможность охлаждения зеркальной подложки через корпуса актюаторов.

Работы проводились при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-01276-а) и в рамках государственного задания ИДГ РАН (проект № 0146-2016-0001).

Литература

Александров А.Г. и др. Адаптивная коррекция излучения мощного титан-сапфирового лазера // Журнал прикладной спектроскопии. т. 72. № 5. 2005. с. 678–683.

Кудряшов А.В. и др. Анализ способа компенсации волнового фронта при использовании датчика Шэка-Гартмана как элемента адаптивной оптической системы // Автометрия, 2012. 48 (2), с. 52–56.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости 1953. – 248 с.,
Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики. УФН. 2014. 184, с. 599–640.

Babcock H.W. (1953). The possibility of compensating astronomical seeing, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 65(386), pp. 89–98.

Bifano T. (2011) Adaptive imaging: MEMS deformable mirrors, Nature Photonics 5, pp. 21–23.

Bifano T. et al. (1999) Microelectromechanical deformable mirrors, IEEE J. Sel. Top. Quant. 5, pp. 83–89.

Biss MD.P. et al. (2007). In vivo fluorescent imaging of the mouse retina using adaptive optics, Optics Letters 32 (6), pp. 659–661.

Dixit A. et al. (2014) Characterization of multichannel deformable mirror for adaptive optics applications, Asian Journal of Physics, 23(4), pp. 581–590.

Daniel A. et al. (2016). Wavefront for glare reduction, Optica 3, pp. 1104–1106.

Fried D. (1982). Anisoplanatism in adaptive optics, Journal of the Optical Society of America, 72(1), pp. 52–61.

Kudryashov A. et al. (2015). Extremely high-power CO₂ laser beam correction. Applied Optics 54(14), pp. 4352–4358.

Roorda A. Applications of Adaptive Optics for Vision and Ophthalmoscopy, OSA Technical Digest, 2007.

Samarkin V. et al. (2016). Wide aperture piezoceramic deformable mirrors for aberration correction in high-power lasers, High Power Laser Science and Engineering 4, p. e4.

Toporovskiy V. et al. (2018). High spatial resolution bimorph deformable mirror for laser beam control, Proceedings SPIE 10518, p. 1051821.

Tyson R. (2011). Principles of Adaptive Optics, 299 p.

Wlodarczyk K. L. et al. (2014). Scalable stacked array piezoelectric deformable mirror for astronomy and laser processing applications, Review of Scientific Instruments, 85, p. 024502.

Xue M.L. et al. (2013). Structure and closed-loop control of a novel compact deformable mirror for wavefront correction in a high-power laser system, Laser Physics Letters, 10(4), p. 045301.