

В.И. Аксиин, Ю.В. Данченко, Е.А. Иванова, С.А. Четкин

КРУПНОГАБАРИТНОЕ СФЕРИЧЕСКОЕ АДАПТИВНОЕ ЗЕРКАЛО

Описана конструкция адаптивного зеркала, выполненного в виде тонкой пластины на упругом основании из высокопористого ячеистого металла (ВПЯМ), деформируемой дискретными актюаторами. Использование ВПЯМ позволяет изготовить охлаждаемое зеркало, большого диаметра, сохранив широкий диапазон смещений рабочей пластины под действием актюаторов, увеличить частотный диапазон работы зеркала, повысить стабильность и улучшить качество его отражающей поверхности. Предложена модель для расчета основных характеристик зеркала. В рамках модели определены безразмерные параметры, характеризующие форму функций отклика и диапазон смещений рабочей пластины под действием актюаторов.

Методы адаптивной оптики находят широкое применение в астрономии и лазерной технике [1]. Применительно к адаптивным оптическим системам, предназначенным для использования в крупногабаритных астрономических телескопах и широкоапертурных лазерных системах, проблема создания облегченного крупногабаритного многоэлементного активнодеформируемого зеркала, способного поддерживать заданную форму отражающей поверхности с точностью, сопоставимой с точностью финишных операций ее приготовления, в условиях действия в общем случае нестационарных термических, гравитационных и лучевых нагрузок, является одной из основных.

В [2–4] проводилось исследование облегченного крупногабаритного активного зеркала в виде тонкой композиционной пластины. Зеркало такого типа предполагалось использовать в космической астрономии для решения традиционной проблемы крупногабаритной оптики, т. е. для обеспечения за счет применения методов активного регулирования высокого уровня стабильности геометрии отражающей поверхности в условиях гравитационного и теплового воздействия окружающей среды. В этом зеркале управление формой отражающей поверхности предполагалось осуществлять точечными силами (или моментами) что не позволяло изготовить методами полировки на протяженной пластине малой толщины, опирающейся на конечное число точечноподобных механических опор — актюаторов, зеркальную поверхность высокого оптического качества [5, 6].

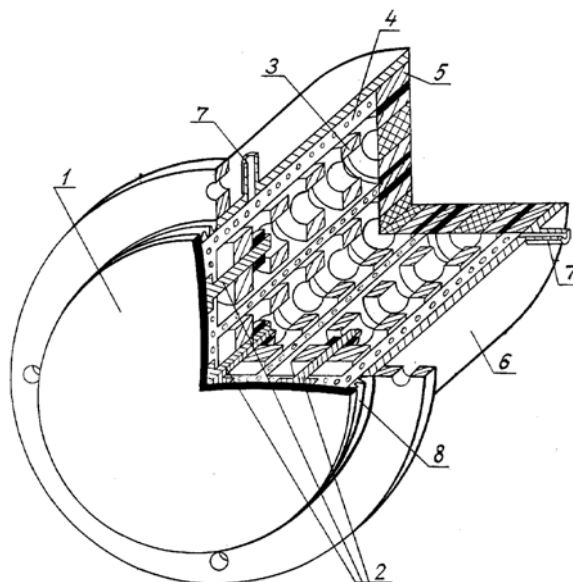


Рис. 1. Схема активного сферического зеркала

В настоящей статье исследуется крупногабаритное облегченное активное зеркало в виде тонкой пластины, лежащей на упругом основании из слоя пронизаемого упругого высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ), в такой конструкции точечный характер силового воздействия актюаторов исключается за счет их заделки в упругий слой, в результате чего управление формой отражающей поверхности в зеркале осуществляется путем контролируемого упругого деформирования отражающей пластины и ее упругого основания.

Использование промежуточного слоя ВПЯМ при создании статических крупногабаритных зеркал позволяет добиться облегчения зеркала в 6–8 раз, при сохранении высокой удельной жесткости конструкции, термостатировать его путем конвективного охлаждения, обеспечивает возможность изготовления отражающей поверхности высокого оптического качества и различной формы (плоской, сферической и асферической) [7].

Возможность управления формой отражающей поверхности такого типа зеркал позволит компенсировать статические нарушения формы отражающей поверхности, связанные с ошибками при полировке, и возникающие при эксплуатации зеркала динамические искажения, обусловленные вибрациями, и, кроме того, обеспечить коррекцию искажений волнового фронта излучения, возникающих при его распространении в оптической системе или атмосфере.

Предлагаемая конструкция зеркала изображена на рис. 1. Зеркало содержит подложку с отражающим покрытием 1, к которой прикреплены толкатели актюаторов 2, актюаторы 3, заполнитель из ВПЯМ 4, опорную плиту 5, корпус 6 с патрубками для подвода и отвода теплоносителя 7. Для освобождения края пластины, что обеспечит более высокую точность управления формой отражающей поверхности, она соединена с корпусом упругим сильфоном 8.

В данном проекте зеркала предполагается использовать (рис. 1) актюаторы в виде многозаходных цилиндрических пружин, выполненных из магнитострикционного материала, реализующих эффект Видемана [8].

При определении профиля отражающей поверхности зеркало будем рассматривать как тонкую пластину на упругом основании из ВПЯМ и будем исходить из предположения о том, что интенсивность реакции упругого основания пропорциональна прогибам $W(\mathbf{r})$ подложки зеркала. В этом случае уравнение для определения изгиба подложки под действием поперечной нагрузки $p(\mathbf{r})$ имеет вид [9]:

$$\Delta \Delta w(\mathbf{r}) = (p(\mathbf{r}) - kw(\mathbf{r}))/D, \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, называемый модулем упругости основания; D — цилиндрическая жесткость рабочей пластины.

В случае подложки, нагруженной в центре силой \mathbf{P} , интенсивность $p(\mathbf{r})$ обращается в нуль по всей площади подложки, за исключением центра, тогда уравнение (1) принимает вид

$$(d^2 / dr^2 + r^{-1} d / dr)(d^2 w / dr^2 + r^{-1} dw / dr) + k / D w = 0. \quad (2)$$

Обозначив $k/D = l^{-4}$ и введя безразмерные переменные $z = w/l$ и $x = r/l$, получаем

$$\Delta \Delta z + z = 0, \quad (3)$$

где символом Δ обозначено $d^2/dx^2 + x^{-1} d/dx$.

Общее решение уравнения (3) с точностью до членов x^{18} включительно имеет вид [13]

$$\begin{aligned} w = p / (8\pi k l^2) & (a_1(1 - 1,56 \cdot 10^{-2} x^4 + 6,78 \cdot 10^{-6} x^8 - 4,71 \cdot 10^{-10} x^{12} + 9,39 \cdot 10^{-15} x^{16}) + \\ & + (a_2 + \ln x)(x^2 - 1,74 \cdot 10^{-3} x^6 + 2,71 \cdot 10^{-7} x^{10} - 9,61 \cdot 10^{-12} x^{14} + 1,16 \cdot 10^{-16} x^{18}) + 1,45 \cdot 10^{-3} x^6 - \\ & - 2,28 \cdot 10^{-7} x^{10} + 9,19 \cdot 10^{-12} x^{14} - 1,18 \cdot 10^{-16} x^{18}). \end{aligned} \quad (4)$$

где a_1 и a_2 — постоянные, определяемые из условий заделки края зеркала. Для зеркала со свободным краем это следующие условия:

$$\begin{aligned} (d^2 w / dr^2 + \mu r^{-1} dw / dr)_{r=R} &= 0; \\ d / dr (d^2 w / dr^2 + r^{-1} dw / dr)_{r=R} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где μ — коэффициент Пуассона; R — радиус подложки. При заданных размерах подложки и модулях упругости подложки и заполнителя соотношения (5) приводятся к двум линейным относительно a_1 и a_2 уравнениям. Из (4) следует, что форма функций отклика определяется значениями a_1 и a_2 , которые, в свою очередь, зависят от безразмерного параметра $L = R/l$ и коэффициента Пуассона материала подложки μ .

Рассмотренный случай соответствует зеркалу с одним актюатором, расположенным в центре, однако если пренебречь упругой связью актюаторов через подложку, можно применить аналогичное описание к многоактюаторному зеркалу; в этом случае радиус подложки в выражениях (5) необходимо положить равным половине расстояния между актюаторами, т.е. $R = a/2$. Это подразумевает, что актюаторы равномерно заполняют поверхность подложки. Такое расположение позволяет использовать в процессе управления всю отражающую поверхность зеркала и обеспечить формирование отражающих поверхностей сложной формы.

Таблица 1

L	0,1	1,1	2,0	3,2	4,0
$\frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{\max}} \cdot 10^{-6}$	7,10 ⁻⁶	0,1	0,6	0,9	0,7

Для эффективной коррекции искажений волнового фронта функции отклика должны удовлетворять двум условиям; во-первых, их форма должна отличаться от плоскости, причем величина деформации поверхности на краю пластины должна быть не менее 10% от величины деформации в центре; во-вторых, желательно, чтобы функция отклика была монотонной, так как это упростит процесс управления зеркалом.

Из этих условий однозначно определяется диапазон изменения параметра L . На рис. 2 представлены характерные функции отклика, вычисленные для меди ($\mu = 0,34$) при различных значениях параметра L . При $L < 1$ функция отклика практически не отличается от плоскости (случай $L = 0,1$ на рис. 2), поэтому этот диапазон изменения L не представляет интереса при конструировании зеркал с управляемой формой отражающей поверхности. Из табл. 1 условие $\frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{\max}} = 0,1$ выполняется при значении $L = 1,1$, которое и является нижней границей диапазона изменения параметра L . Нарушение монотонности функции отклика происходит при $L > 3,2$ (случай $L = 4$ на рис. 2). Таким образом, значение $L = 3,2$ является верхней границей диапазона изменения L , то есть область допустимых значений изменения этого параметра $1,1 \leq L \leq 3,2$.

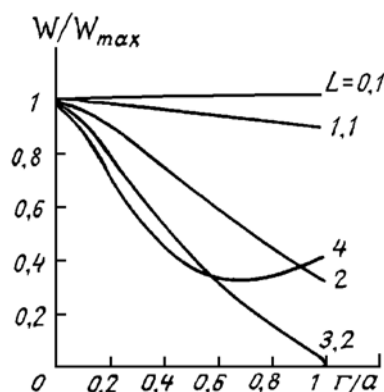
Рис. 2. Характерный вид функций отклика активного зеркала в зависимости от значения параметра L

Таблица 2

G	W/W_0		
	L		
	1,1	2,0	3,2
6,0	0,63	0,47	0,45
7,5	0,68	0,52	0,50
10,0	0,74	0,59	0,57

При заданном параметре L для обеспечения эффективной работы актюатора необходимо согласовать жесткость актюатора и модули подложки и заполнителя. Будем характеризовать эффективность работы актюатора отношением удлинения актюатора в составе зеркала W к удлинению актюатора в свободном состоянии W_0 . Удлинение актюатора совпадает со смещением подложки в месте его расположения:

$$W = w(x = 0) = a_1 P / (8\pi k l^2) = -PK_a^{-1} + W_0, \quad (6)$$

откуда

$$W/W_0 = 1 - 1/(1 + a_1 G/(8\pi)), \quad (7)$$

где $G = K_a(kD)^{-1/2}$, K_a — жесткость актюатора. На рис. 3 представлены зависимости $W/W_0(G)$ при различных значениях L . Для практически важных случаев $L > 1,1$ относительное удлинение актюатора W/W_0 быстро падает с уменьшением параметра G , поэтому для обеспечения эффективной рабо-

ты актюатора необходимо согласовать модули заполнителя, подложки и актюаторов. Как правило, работу актюатора можно считать эффективной, если реализуется относительное удлинение $W/W_0 \geq 0,5$. Чтобы это условие выполнялось для всех значений L из заданного диапазона ($1,1 \leq L \leq 3,2$), параметр G должен быть больше 7,5 (табл. 2).

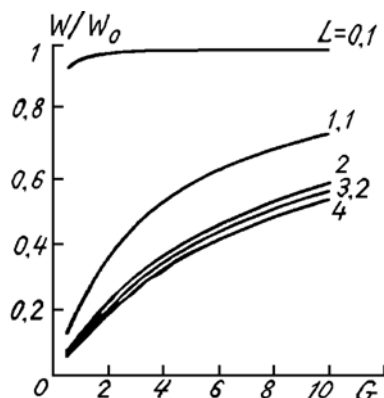


Рис. 3. Семейство зависимостей передаваемого через слоистую подложку активного зеркала развиваемого актюатором смещения $W/W_0(G)$ от величины относительной жесткости актюатора G для различных значений L

Результаты моделирования с использованием описанной аналитической модели активного зеркала были положены в основу конструкции активного зеркала, эскиз которого приведен на рис. 1. При этом процесс изготовления данного зеркала может быть осуществлен (на примере меди) следующим образом:

1. Собирается трехслойная заготовка зеркала, причем вместо промежуточного упругого металлического слоя используется слой пенополиуретана заданной пористости и заданного структурного строения. Для связи этих слоев между собой трехслойный пакет пропитывается в растворе химического меднения, а затем производится металлизация, в результате которой медь осаждается как на структурные элементы пенополиуретановой заготовки, так и на металлические части конструкции, в результате чего между ними образуется жесткая связь.

2. Проводится процесс термоокислительного отжига конструкции при 500°C на воздухе, в результате которого из заполнителя удаляется пенополиуретан.

3. Производится восстановление и спекание конструкции в среде водорода при температуре 950°C . В результате металлизации и спекания формируется прочный контакт структурных элементов (перемычек) заполнителя с подложкой, опорной плитой и толкателями. Далее, в посадочные отверстия со стороны опорной плиты устанавливаются актюаторы, собранная конструкция помещается в корпус, к которому прикреплены патрубки, для подвода и отвода теплоносителя, после чего производится оптическая обработка подложки зеркала.

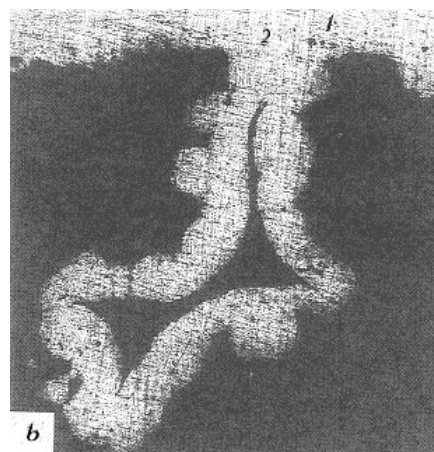
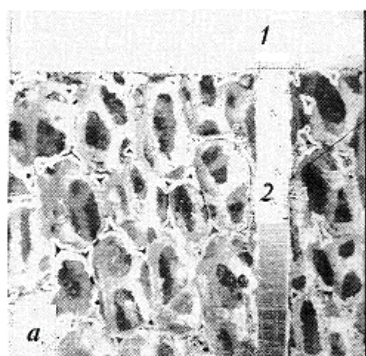


Рис. 4. Микрофотографии экспериментально реализованной структуры композиционной медной подложки активного зеркала: *a* — 1 — компактный слой (подложка зеркала), 2 — макет актюатора; *б* — соединение компактной подложки зеркальной поверхности и упругого проницаемого подслоя из ВПЯМ

Описанная технология получения жесткого контакта между элементами зеркала проверялась на опытном образце в виде двух медных пластин, между которыми помещался пенополиуретановый наполнитель со вставленными в него медными стержнями, прикрепленными концами к пластинам. На рис. 4 показана получившаяся структура.

1. Харди Дж. У. //ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 6. С. 31–84.
2. Бушнелл Д., Ског И. //Ракетная техника и космонавтика. 1979. Т. 17. № 3. С. 78–86.
3. Бушнелл Д. //Ракетная техника и космонавтика. 1979. Т. 17. № 1. С. 92–99.
4. Бушнелл Д. //Ракетная техника и космонавтика. 1979. Т. 17. № 1. С. 83–91.
5. Максудов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. Л.: ОГИЗ, 1948. 280 с.
6. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика. Л.: ОГИЗ, 1945. 368 с.
7. Алексеев В. А., Анциферов В. Н., Аполлонов В. В. и др. //Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 22. С. 1350–1354.
8. Аполлонов В. В., Бородин В. И., Брынских А. С. и др. //Квантовая электроника. 1989. Т. 16. С. 392–394.
9. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. С. 290–315.

Институт общей физики РАН,
Москва

Поступила в редакцию
9 декабря 1991 г.

V. I. Aksinin, E. A. Ivanova, S. A. Chetkin, Yu. V. Danchenko. **A Big Spectral Adaptive Mirror.**

A construction of an adaptive mirror in the form of a thin plate on an elastic base made of a porous cellular metallic material is described. The plate shape is controlled by discrete actuators. The use of such a material for the mirror base enables one to make a cooled mirror of a large size while keeping the actuator produced shifts of the plate in a wide range. In addition, the frequency range of the mirror operation can be widened and the quality of the reflecting surface improved. A model of the mirror is suggested in the paper, that enables one to calculate the basic parameters of the mirror. Within the frameworks of this model certain dimensionless parameters are determined. These parameters characterize the shape of the response functions and the range of the plate shifts produced by the actuators.