

**Биморфное адаптивное зеркало / А.В. Икрамов, С.В. Романов, И.М. Рощупкин, А.Г. Сафронов, А.О. Сулимов // Научное приборостроение. -1992. -Т. 2. -№ 3: Лазеры и современное приборостроение. - С. 59-64.**

Рассматривается медное охлаждаемое адаптивное зеркало на основе двойной биморфной структуры, предназначенное для компенсации крупномасштабных оптических aberrаций, в том числе в энергетических системах мощностью до 15 кВт. Описывается конструкция адаптивного зеркала, приводятся результаты расчетных и экспериментальных исследований: термические отражающие поверхности, функции отклика управляющих электродов, частотные свойства. Оценивается эффективность компенсации оптических aberrаций низкого порядка. Библиография 6 назв. Ил. 6.

А. В. Икрамов, С. В. Романов, И. М. Рощупкин,  
А. Г. Сафронов, А. О. Сулимов  
(НПО "Композит", Калининград Московской обл.)

### БИМОРФНОЕ АДАПТИВНОЕ ЗЕРКАЛО

Одним из путей улучшения характеристик современных оптических систем и расширения их возможностей является применение зеркал с управляемой отражающей поверхностью. Как правило, адаптивные зеркала выполняют функцию компенсации искажений волнового фронта излучения [1, 2]. В целом ряде задач, например, при динамической фокусировке лазерного пучка, существенное улучшение параметров оптической системы достигается за счет компенсации, в первую очередь, крупномасштабных искажений волнового фронта, таких, как дефокусировка, астигматизм, сферическая aberrация. В этом случае бывает удобно использовать биморфные адаптивные зеркала [3], в которых отражающая поверхность управляется за счет деформаций полупассивного биморфа, образованного пьезокерамической и зеркальной пластинами.

Биморфное адаптивное зеркало состоит из корпуса 1, отражающей пластины толщиной 0,5 мм 2, охлаждаемой подложки толщиной 1,0 мм 3, верхней 4 и нижней 5 пьезопластин с секционированными управляющими электродами (рис. 1). Корпус представляет собой медный цилиндр диаметром 76 мм, высотой 9,5 мм и толщиной торца 1,5 мм. На торце корпуса сделаны сквозные выемки (рис. 2), так что его центральная часть, являющаяся гибкой охлаждаемой пластиной, оказывается "подвешенной" на восьми перемычках. На подложке диаметром 50 мм сформирована система охлаждения "вафельного" типа в виде решетки с каналами, причем для увеличения теплоотвода [4] каналы ориентированы под углом 45° к линии, соединяющей отверстия в корпусе для подвода и отвода хладагента. Внутри всех перемычек также сформированы каналы охлаждения, которые соединяют "вафельную" структуру гибкой пластины с коллекторами подвода и отвода хладагента, выполненными внутри корпуса. К гибкой охлаждаемой пластине последовательно крепятся две пьезоэлектрические пластины диаметром 50 и 45 мм. Толщина верхней пластины 1 мм, нижней — 0,3 мм, причем на нижней пластине сформирована система из 17 секционированных управляющих электродов. Последние условно можно разделить на три группы: центральный электрод — круг

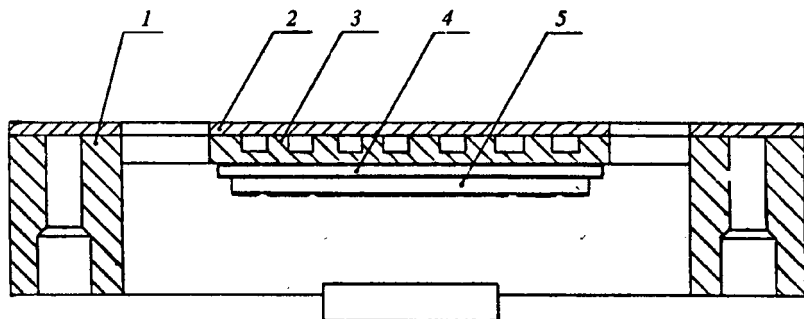


Рис. 1. Конструкция биморфного адаптивного зеркала.  
Объяснение в тексте.

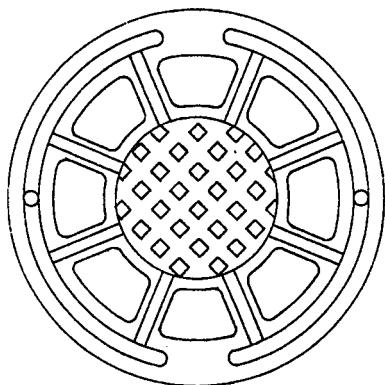


Рис. 2. Конструкция системы охлаждения адаптивного зеркала.

радиусом 9 мм; восемь электродов — сектора среднего кольца с радиусом 17 мм; восемь электродов — сектора внешнего кольца с радиусом 20,6 мм. Таким образом, общее количество электродов адаптивного зеркала — 19.

Для численного моделирования конструкции адаптивного зеркала использовался метод конечных элементов. В результате расчетов выбраны следующие параметры системы охлаждения: шаг каналов 1,1 мм; ширина каналов 0,6 мм; глубина каналов 0,5 мм.

Для данной системы охлаждения установлено, что при изменении температуры окружающей среды на 1 °С за счет значительного расхождения коэффициентов термического расширения (КТР) пьезокерамики и меди отражающая пластина деформируется с  $\text{reak value}$  0,44 мкм. Кроме того, при воздействии на отражающую поверхность лазерного пучка плотностью 1 кВт/см<sup>2</sup> диаметром 40 мм происходит нагрев отражающей пластины на 2,5 °С и небольшое нагревание пьезокерамики — примерно на 0,15 °С. Данное распределение температур получено при расходе теплоносителя 1 л/мин. При этом максимальное смещение отражающей поверхности не превышает 2,4 мкм.

Формы и частоты свободных колебаний конструкции определены на трехмерной конечно-элементной модели фазового корректора. Частота первого резонанса адаптивного зеркала составляет 2,7 кГц. Результатом расчетов функций отклика поверхности зеркала на воздействие отдельных электродов явилось их разложение в ряд по полиномам Цернике. Учитывались первые 36 полиномов\*. Нагляднее при таком разложении функции отклика верхней пьезопластины и центрального электрода нижней пьезопластины

$$f_1(r/a) = 6,3 Z_1(r/a) - 3 Z_4(r/a) + 0,04 Z_{11}(r/a) + 0,2 Z_{22}(r/a),$$

$$r \in \Omega_2, \quad (1)$$

\* Разложение в ряд по полиномам Цернике представляет собой стандартную процедуру. Выражения же для самих полиномов и необходимые формулы для них можно найти, например, в работе [6]. Приведем лишь выражения для полиномов, непосредственно входящих в разложения (1) и (2):

$$Z_1(r/a) = 1,$$

$$Z_4(r/a) = \sqrt{3} (2(r/a)^2 - 1),$$

$$Z_{11}(r/a) = \sqrt{5} (6(r/a)^4 - 6(r/a)^2 + 1),$$

$$Z_{22}(r/a) = \sqrt{7} (20(r/a)^6 - 30(r/a)^4 + 12(r/a)^2 - 1),$$

где радиус-вектор  $r$  определен в круге радиусом  $a$ .

$$f_2(r/a) = 2,5 Z_1(r/a) - 1,8 Z_4(r/a) + 0,46 Z_{11}(r/a) + 1,2 Z_{22}(r/a),$$

$$r \in \Omega_a, \quad (2)$$

где  $f_1(r/a)$  — функция отклика верхней пьезопластины,  $f_2(r/a)$  — функция отклика центрального электрода нижней пьезопластины,  $\Omega_a$  — область апертуры адаптивного зеркала,  $a$  — радиус апертуры адаптивного зеркала (25 мм),  $Z_i(r/a)$  — полиномы Цернике. Функции отклика электродов нижней пьезопластины из внешнего и среднего колец имеют более сложное разложение, поэтому для наглядности их удобнее изобразить в виде графиков (рис. 3).

С помощью функций отклика отражающую поверхность  $S(r/a)$  адаптивного зеркала можно представить следующим образом [5]:

$$S(r/a) = \sum_{i=1}^N A_i f_i(r/a), \quad r \in \Omega_a,$$

где  $f_i(r/a)$  — функция отклика  $i$ -го электрода при максимальном управляющем воздействии,  $A_i$  — управляющее воздействие на  $i$ -м электроде ( $A_i \in [-1; 1]$ ),  $N$  — число управляющих электродов ( $N = 18$ ).

Функции отклика  $f_i(r/a)$ , в свою очередь, можно представить в виде разложения по полиномам Цернике  $Z_j(r/a)$

$$f_i(r/a) = \sum_{j=1}^M B_{ij} Z_j(r/a), \quad r \in \Omega_a,$$

где  $M$  — число используемых полиномов,  $B_{ij}$  — коэффициенты разложения.

Тогда поверхность фазового корректора будет выглядеть так:

$$S(r/a) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A_i B_{ij} Z_j(r/a), \quad r \in \Omega_a.$$

Таким образом, последнее выражение характеризует класс поверхностей, которые может воспроизводить адаптивное зеркало.

На задней крышке зеркала крепится электрический разъем для подвода управляющего напряжения на электроды (рис. 4). Пьезокерамические пластины изготовлены из керамики ЦТС19 (нижняя) и ЦТСНВ-1 (верхняя). Максимальное напряжение —  $\pm 300$  В. В данной конструкции адаптивного зеркала дополнительная (верхняя) пьезопластина обеспечивает быструю компенсацию искажений волнового фронта в виде дефокусировки, которые возникают, например, при распространении интенсивных лазерных пучков в газах; повышает деформации отражающей поверхности адаптивного зеркала; может "устранять" гистерезис нижней (секционированной) пьезопластины за счет подачи напряжения, корректирующего остаточные деформации отражающей поверхности.

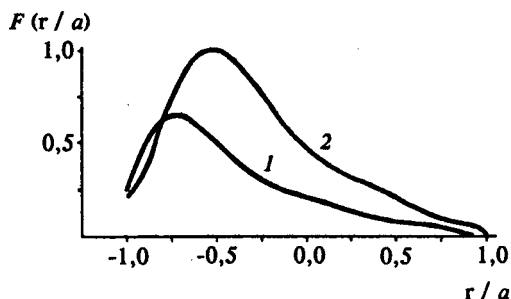


Рис. 3. Нормированные функции отклика  $F(r/a)$  для управляющего электрода нижней пьезопластины из внешнего (1) и среднего (2) колец.

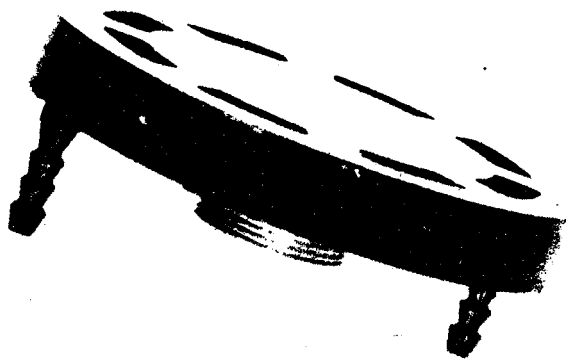


Рис. 4. Внешний вид адаптивного зеркала.

Интерферометрические исследования адаптивного зеркала проводились на интерферометре "MARK-III" фирмы Zygo. Значения параметров на интерферограмме исходной поверхности зеркала (рис. 5, а) даны в полосах при  $\lambda = 632,8$  нм. Как видно из рисунка, зеркало имеет местную ошибку менее  $\lambda/2$  (без коррекции). На интерферограмме той же самой поверхности при уменьшении температуры на  $2,5-3$  °С (рис. 5, б), видно, что поверхность зеркала де-

формировалась из-за разницы в коэффициентах термического расширения на четыре кольца (1,27 мкм) (деформация имеет высокую сферичность). Если учесть, что расчетная величина деформации зеркала при изменении температуры на 1 °С составляет 0,44 мкм, то можно сказать, что термические деформации зеркала находятся в соответствии с расчетом (при изменении температуры на  $2,5-3$  °С расчетная величина деформации составляет  $1,1-1,32$  мкм).

Коэффициент зеркального отражения (КЗО) адаптивного зеркала равен 99,0 %. Измерения проводились на стенде по методике определения абсолютного значения КЗО с использованием кюветы многократных отражений на длине волны 10,6 мкм.

Функции отклика измерялись на интерферометре с последующей обработкой на ЭВМ. Для всех электродов можно отметить хорошее совпадение формы расчетных и экспериментальных функций отклика. При подаче управляющего напряжения 177 В на верхнюю пьезопластину деформация отражающей поверхности составила 19 колец (6,0 мкм). Для электродов нижней (секционированной) пьезопластины при управляющем напряжении 177 В деформация (peak value) для центрального электрода равна 17 кольцам (5,3 мкм), для электродов среднего кольца — 7 (2,3 мкм), для электродов внешнего кольца — 5 (1,5 мкм).

Из приведенных функций отклика адаптивного зеркала (1), (2) (см. рис. 3) видно, что наиболее хорошо зеркало "работает" по осесимметричным aberrациям типа дефокусировки и сферической aberrации. На рис. 6 представлены среднеквадратичные отклонения остаточной ошибки  $\Delta S_{ocm}$  при аппроксимации адаптивным зеркалом отдельных aberrаций низкого порядка в зависимости от их амплитуды PV (peak value). Из графиков видно, что адаптивное зеркало хорошо компенсирует дефокусировку с PV 12,5 мкм (СКО остаточной ошибки не превосходит 0,06 мкм) и сферическую aberrацию с PV 1,1 мкм (СКО остаточной ошибки не превышает 0,02 мкм). Компенсация астигматизма, комы и трилистника с амплитудой порядка 1 мкм дает остаточную ошибку порядка 0,1 мкм (по СКО).

К недостаткам биморфного адаптивного зеркала следует отнести его высокую чувствительность к изменению температуры, что является следствием различия КТР меди и пьезокерамики. Этот недостаток, однако, не приведет к сильным искажениям в реальной оптической системе, поскольку адаптивное зеркало "отработает" свои же термодформации, имеющие, как было показано,

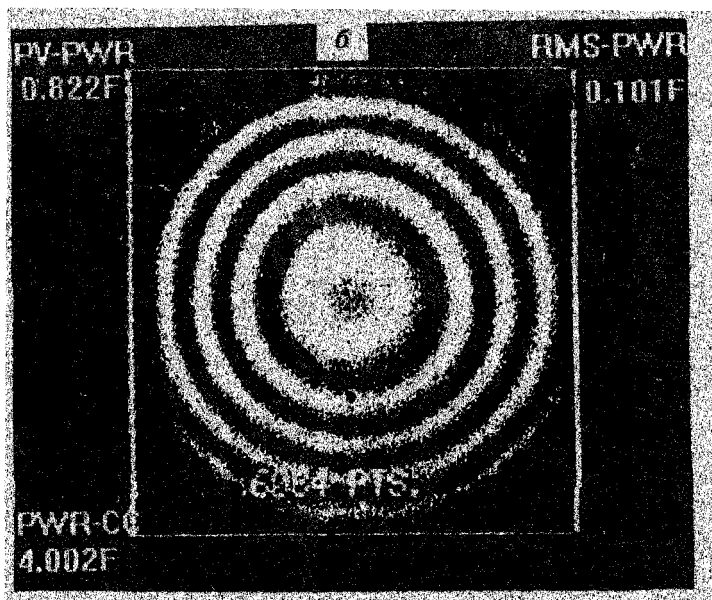
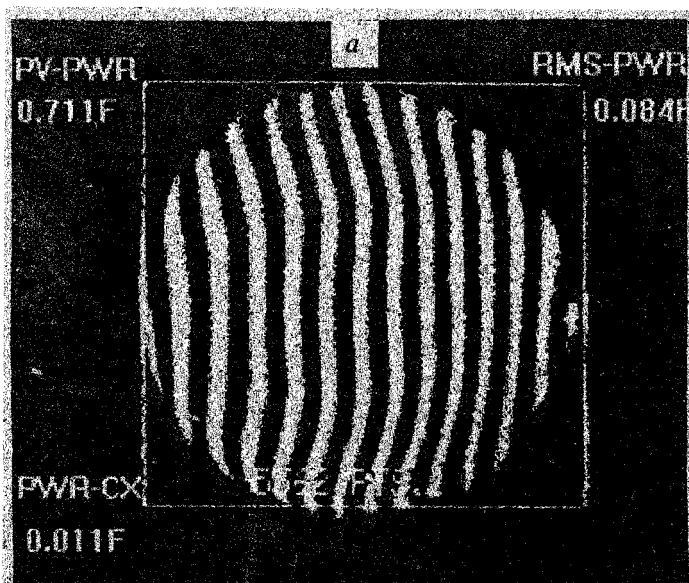


Рис. 5. Интерферограммы поверхности адаптивного зеркала.  
Объяснение в тексте.

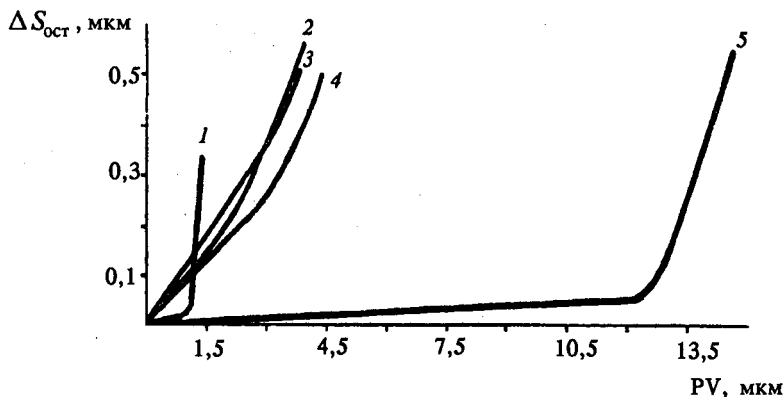


Рис. 6. Аппроксимация адаптивным зеркалом аберраций низкого порядка. 1 — сферическая аберрация, 2 — трилистник, 3 — кома, 4 — астигматизм, 5 — дефокусировка.

высокую сферичность. Другими словами, часть динамического диапазона адаптивного зеркала (в данном случае по дефокусировке 12,5 мкм) будет использована для устранения собственных термомискажений, и, так как диапазон управляемых деформаций достаточно большой, термдеформации его существенно не изменят. Кроме того, использование системы охлаждения в случае мощных лазерных пучков снижает температурные воздействия.

На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод. Данное адаптивное биморфное зеркало благодаря высоким деформациям отражающей поверхности способно эффективно работать в оптических системах в качестве корректора аберраций низкого порядка. Частотные характеристики зеркала позволяют использовать его в системах с частотным спектром до 2 кГц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Roux R. // Laser Focus World. 1990. V. 26, № 3. P. 60-64.
2. Pearson E., Stepp L., Fox J. // Opt. Eng. 1988. V. 27, № 2. P. 115-122.
3. Николаев П. В., Смирнов А. В. // ОМП. 1987. № 11. С. 47-53.
4. А. с. МКИ НО1S 3/02 (199) (СССР).
5. Тараненко В. Г., Горохов Ю. Г., Романюк Г. С. // Зарубежная радиоэлектроника. 1982. № 8. С. 19-43.
6. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М., 1985. 336 с.

Рукопись поступила 2.03.92.