

07; 12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АДАПТИВНОГО ЗЕРКАЛАВ.В. Аполлонов, Е.А. Иванова,
А.М. Прохоров, С.А. Четкин

В адаптивной оптике одной из основных является проблема синтеза формы зеркальной поверхности методом контролируемого упругого деформирования подложки в ограниченном числе точек [1]. Для решения задачи формирования с требуемой точностью ϵ заданного рельефа отражающей поверхности необходимо знание вида функций отклика (ФО) поверхности гибкого адаптивного зеркала (АЗ) на действие каждого актюатора с неменьшей чем ϵ точностью. (Под ФО в данной работе понимается рельеф отражающей поверхности, формируемый при подаче только на один из системы актюаторов АЗ управляющего сигнала). Знание ФО отражающей поверхности АЗ позволяет описывать любую формируемую АЗ форму отражающей поверхности в виде их суперпозиции.

АЗ выполняется на подложке в виде пластины, закрепленной каким-либо образом по периметру и опертой на актюаторы, представляющие упругие опоры. С точки зрения общности постановки задачи и эффективности деформирования зеркальной подложки естественно допущение о соизмеримости жесткости отдельного актюатора и цилиндрической жесткости подложки. В этом случае между актюаторами существует упругая связь через гибкую подложку АЗ, т.е. в формировании ФО участвуют упругие силы реакции от всей системы актюаторов АЗ. Такая особенность в формировании ФО определяется нами как нелокальная.

Таким образом, вид ФО гибкого АЗ определяется жесткостями воздействующего актюатора, подложки, системы актюаторов, находящихся в свободном состоянии (для актюаторов, выполненных из электро- или магнитострикционного материала, их жесткость, в силу ΔE - эффекта [2], определяется уровнем поляризации материала, т.е. в том числе и величиной управляющего сигнала), числом и взаимным расположением актюаторов. С учетом сформулированных особенностей задача определения вида ФО гибкого АЗ не имеет удовлетворяющего требования адаптивной оптики решения.

В настоящей работе, продолжающей [3], развит полуэмпирический подход к анализу формообразования отражающей поверхности многоактюаторного гибкого АЗ. Исследование ФО отражающей поверхности АЗ проводилось с использованием стробоскопического интерферометра [3]. Методика обработки интерферограмм позволяла осуществлять восстановление формы зеркальной поверхности в заданном сечении с точностью $\lambda/20$ ($\lambda = 0.63$ мкм).

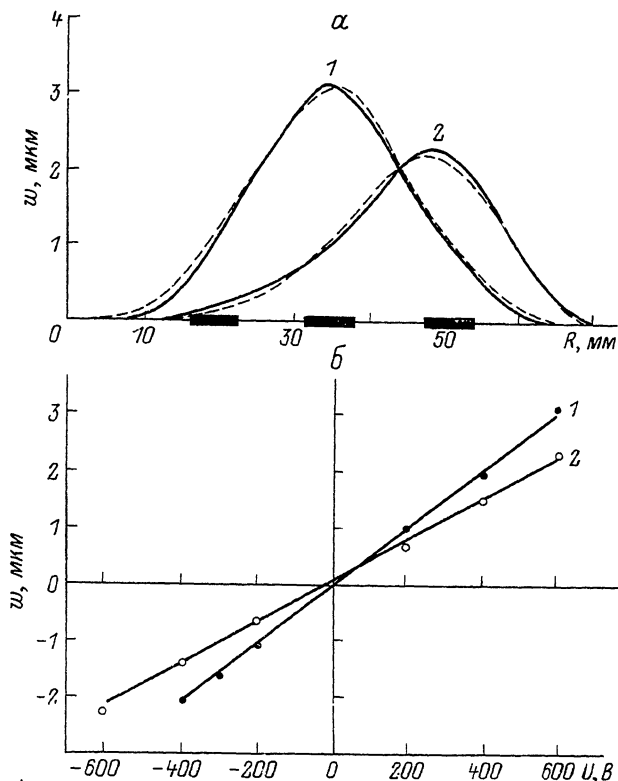


Рис. 1. а) Функции отклика адаптивного зеркала на действие бокового (2) и центрального (1) актюаторов. Пунктиром показаны функции отклика, рассчитанные в рамках модели тонкой пластины. б) Зависимость размаха смещения зеркальной поверхности от величины приложенного к актюатору напряжения в случае действия центрального (1) и бокового (2) актюатора.

В теории деформируемого АЗ вопрос воспроизводимости формы ФО отражающей поверхности при различных уровнях прогиба подложки является принципиальным. Для исследуемого АЗ определение стабильности и точности формообразования зеркальной поверхности, подложка которой выполнена не из традиционных для оптики стекла, кварца, ситалла, обладающих свойствами стабильности формы в нагруженном состоянии, а из металла, проявляющего пластические свойства, представляет также практический интерес.

Результаты проведенных исследований показывают, что при различных уровнях развиваемого актюатором смещения нормированная на максимум ФО списывается для каждого актюатора универсальной поверхностью с абсолютной точностью не хуже 0,06 мкм (рис. 1, а). Подложка АЗ заделана по периметру и соединена с системой актюаторов в конечном числе точек, поэтому ФО должна описываться суперпозицией аналитических выражений, каждое из которых есть решение уравнения тонкой пластины для точечной силы,

приложенной в месте расположения отдельного актюатора, с соответствующими заделке периметра подложки граничными условиями [4]:

$$\omega = \omega_0 \left[(1-r^2)(1-\rho^2) + (r^2+\rho^2-2r\rho\cos(\varphi-\alpha)) \right] \times \\ \times \ln \left\{ (r^2+\rho^2-2r\rho\cos(\varphi-\alpha)) / (1+r^2\rho^2-2r\rho\cos(\varphi-\alpha)) \right\}, \quad (1)$$

где ω - прогиб пластины в точке r, φ ; ρ, α - нормированные на радиус подложки координаты приложения сосредоточенной силы; $\omega_0 = PR^2/16\pi D$; $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ - цилиндрическая жесткость подложки; h - ее толщина, E, ν - модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала подложки; P - величина развиваемой актюатором силы.

Из-за неполной контролируемости условий изготовления и закрепления актюаторов в АЗ, они имеют различные жесткости, величины которых из интерференционных измерений установить не представляется возможным. Поэтому, вклад каждого актюатора при формировании ФО определялся нами методом наименьших квадратов ошибок рассогласования экспериментально установленной ФО и суперпозиции аналитических выражений (1), описывающих вид ФО.

Сравнение экспериментальных и расчетных ФО (рис. 1, а) показывает, что теория тонкой пластины, с учетом допущения точечного характера действия актюатора, является хорошим приближением и может служить основой для развития теории АЗ такого типа.

Интересно отметить, что в пределах экспериментальной погрешности ($\lambda/20$, $\lambda = 0.63$ мкм) имеет место отмечавшийся ранее [3] принцип аддитивности, а именно - форма отражающей поверхности АЗ при совместном действии нескольких актюаторов является точной арифметической суммой ФО АЗ каждого действующего актюатора.

Зависимость между величиной максимума ФО и величиной постоянного напряжения, приложенного к актюатору, при условии, что для каждого измерения постоянное напряжение прикладывалось после деполяризации актюатора переменным напряжением убывающей амплитуды, приведена на рис. 1, б. Эта связь линейна, хотя материал актюатора ПКР-6 [3], имеет гистерезис пьезомеханических свойств.

Таким образом, экспериментальное исследование показало, что ФО АЗ $\Phi(x, y)$ при снятии остаточной (коэрцитивной) поляризации, обусловленной гистерезисом, описывается выражением

$$\Phi(x, y) = \sum_i K_i U_i f_i(x, y), \quad (2)$$

где U_i - величина приложенного к актюатору напряжения, i - номер актюатора; K_i - коэффициент пропорциональности, характеризующий механическую и пьезоэлектрическую жесткости актюатора; $f_i(x, y)$ - нормированные по максимуму ФО, характерные для данного АЗ, описываемые с точностью не хуже 3% выражением

$$f_i(x, y) = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij}(U_i) \varphi_j(x, y, \vec{r}), \quad (3)$$

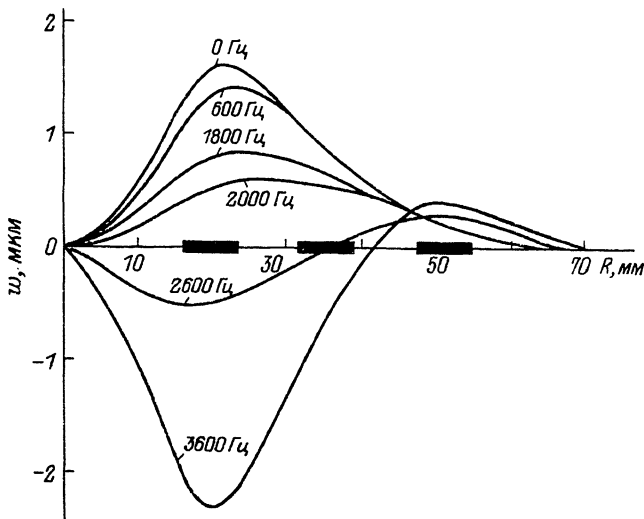


Рис. 2. Функции отклика адаптивного зеркала при возбуждении бокового актюатора синусоидальным сигналом амплитудой 400 В на частоте от 0 до 3 кГц.

где $\varphi_j(x, y, \vec{r})$ – решения уравнения тонкой пластины с граничными условиями, соответствующими конструкции АЗ, деформируемого точечной силой, приложенной в точке расположения j -го актюатора (1), а константы α_{ij} характеризуют пьезомеханическую связь i -го и j -го актюатора.

При приложении к актюатору постоянного напряжения ФО определяется действующими на подложку АЗ силами упругости. При возбуждении актюатора переменным напряжением в общем случае необходимо учитывать силы инерции, так как подложка и актюатор имеют конечные массы.

На рис. 2 приведено семейство нормированных ФО АЗ при возбуждении бокового актюатора на частотах от 0 до 3 кГц напряжением амплитудой 400 В. АЗ имеет первый резонанс на частоте 6.5 кГц [3], однако из полученных данных следует, что в общем балансе сил роль инерции существенна, начиная с частот порядка 100 Гц. В диапазоне частот от 100 Гц до 2.4 кГц действие сил инерции сводится к тому, что ФО становятся более пологими с одновременным уменьшением величины максимума. На частотах, превышающих 2.4 кГц, ФО подобна второй моде колебаний пластинки с заделанным краем, хотя измеренная добротность АЗ на резонансной частоте составляет ≈ 30 [3].

Таким образом, нами экспериментально установлены характерные особенности формирования рельефа отражающей поверхности АЗ в статическом и динамическом режимах. Показано, что в диапазоне

частот сигналов до 100 гц, управляющих работой данного АЗ, формируемая системой актюаторов форма отражающей поверхности, а значит и ФО с высокой степенью точности может быть описана статическим уравнением тонкой пластины. Результаты экспериментального исследования ФО показали, что диапазон частот в котором АЗ может осуществлять компенсацию фазовых искажений оптического излучения, ограничивается не частотой 1-го электро- или магнито-механического резонанса АЗ, а частотой, начиная с которой вид „динамической“ ФО начинает существенно отличаться от статической, как правило, более, чем на порядок меньшей резонансной частоты.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность В.И. Андриюшину, Г.А. Житомирскому и В.В. Останину, С.Н. Темнову за помощь в проведении данной работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Харди Дж. // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 6. С. 31-35.
- [2] Физическая акустика. Под ред. Мэзона. М., 1966. Т. 1. 592 с.
- [3] Аполлонов В.В., Темнов С.Н., Четкин С.А. Препринт ИОФАН СССР, № 231. М., 1987. 26 с.
- [4] Лурье А.И. // Прикладная математика и механика. 1940. Т. 4. В. 1. С. 93-101.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
10 ноября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 2

26 января 1989 г.

01; 05.1

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОЛЕБАНИЙ СРЕДНИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ДЕФЕКТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

М. М и л и т ц е р, Ю.В. Т р у ш и н

Кинетика генерации точечных дефектов и формирование кластеров при облучении подробно исследуются в последние годы. Системой баланса для средних концентраций C_j точечных дефектов ($j = i$ - межузельные атомы, $j = v$ - вакансии, $j = a$ - примесные атомы) и мелких кластеров ($j = 2i, a_i$ и т.д.) является следующая система обыкновенных нелинейных уравнений

$$\dot{C}_j = g_j + \sum_{k=1}^N \rho_{jk} C_k + \sum_{k>l}^N r_{jkl} C_k C_l \quad (j=1, \dots, N). \quad (1)$$