

УДК 535.313.6

Численное моделирование мономорфного деформируемого зеркала в программном комплексе ANSYS

Д.А. Ягнятинский, В.Н. Федосеев*

ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»

142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24

Поступила в редакцию 22.01.2020 г.

На основе численного моделирования в программном комплексе ANSYS разработана конструкция мономорфного (униморфного) деформируемого зеркала. Выбрана структура управляющих электродов, обеспечивающая на световой апертуре отработку aberrаций до 5-го порядка включительно (первые 21 полином Цернике) с высокой точностью воспроизведения. Приведены расчеты основных характеристик мономорфного зеркала: функции влияния электродов, погрешность отработки заданных aberrаций, прогиб зеркала под действием собственного веса, термодформации поверхности зеркала вследствие изменения температуры окружающей среды, термодформации и температурное поле от падающего лазерного излучения, собственные частоты колебаний зеркала. Результаты свидетельствуют о возможности использования зеркала для эффективной работы в составе адаптивной оптической системы.

Ключевые слова: мономорфное деформируемое зеркало, численное моделирование, программный комплекс ANSYS, aberrации, функции влияния, термодформации, собственные частоты; monomorph deformable mirror, numerical simulations, ANSYS software, aberrations, influence functions, thermal deformations, natural frequencies.

Введение

Среди многообразия типов конструкций деформируемых зеркал для адаптивной оптики важное место занимают биморфные зеркала, обладающие рядом преимуществ для использования в некоторых задачах. Принцип работы зеркал такого типа основан на обратном поперечном пьезоэффекте. Название «биморфные зеркала» достаточно общее, существуют следующие основные их разновидности: классические (полупассивные) биморфные, симметричные биморфные, кооперативные биморфные и мономорфные (униморфные) зеркала [1].

Считается, что упомянутые зеркала хорошо подходят для компенсации искажений волнового фронта, определяемых по Колмогоровской модели турбулентной атмосферы. Распределение деформаций волнового фронта по пространственным частотам в этой модели таково, что при невысоких частотах их величина меняется по закону $f^{-11/6}$ [2] — почти обратно пропорционально квадрату частоты. А для биморфных зеркал приблизительно выполняется зависимость поперечной деформации поверхности зеркала w от пространственной частоты [2]:

$$w \sim \frac{1}{f^2}.$$

Это значит, что такое зеркало «хорошо согласуется» с Колмогоровской моделью турбулентности [3].

В настоящей работе рассматривается моделирование мономорфного деформируемого зеркала. Именно такие зеркала в последнее время получили широкое распространение [4–6] благодаря уникальным характеристикам и невысокой стоимости. Мономорфные и классические биморфные деформируемые зеркала часто используются в адаптивных системах woofer-tweeter в качестве элемента woofer [5, 7] для коррекции aberrаций низких (2–4) порядков. Эти зеркала находят свое применение во внутривиброакустическом контроле излучения лазеров [8], в частности для непрерывных лазеров высокой мощности [9], а также для фокусировки излучения мощных импульсных лазеров [10]. Кроме того они используются в различных астрономических оптических системах и телескопах [11–14] из-за малого веса и относительной простоты всей системы, включая многоканальные усилители для подачи напряжения на электроды, и больших величин поперечного прогиба.

Из вышесказанного вытекает важность задачи моделирования мономорфного зеркала для расчета и оптимизации его конструкции. В настоящей статье рассмотрены все важнейшие характеристики мономорфного зеркала в совокупности, включая термомеханические свойства.

1. Конечно-элементная модель мономорфного зеркала

Для расчета характеристик мономорфного зеркала можно использовать либо аналитический подход [1, 15, 16], либо численный — метод конечных

* Дмитрий Александрович Ягнятинский (day@luch.com.ru); Виктор Николаевич Федосеев (fvn@luch.com.ru).

элементов (МКЭ). Первый способ обычно основан на достаточно грубых аппроксимациях и может быть непригодным для всего многообразия расчетов. Второй более универсален и широко применяется исследователями [12, 17, 18]; вычисления при этом проводятся в специальных программных комплексах, реализующих МКЭ. В настоящей работе для численного расчета использовалась система конечно-элементного анализа ANSYS 14.0.

Рассматриваемая модель мономорфного зеркала представляет собой пьезоэлектрический диск, приклеенный к круглой подложке большего диаметра, выполненной из монокристаллического кремния (рис. 1). Толщины пьезодиска и подложки равны 0,6 и 0,5 мм соответственно. Диаметр подложки – 76 мм, диаметр пьезодиска – 50 мм, диаметр апертуры зеркала (световой зоны) на отражающей поверхности – 30 мм. Пьезодиск с обратной стороны делится на зоны для положительных электродов. Центральная зона – круг диаметром 6,8 мм; далее идут три кольца с внешними диаметрами, соответственно, 21; 37,4 и 50 мм. Первое кольцо делится на 8 равных секторов, второе и третье кольца – на 16 равных секторов. Таким образом, мономорфное зеркало имеет 41 управляющий электрод (рис. 1, а). Общий отрицательный электрод (земля) находится между пьезодиском и подложкой и имеет диаметр, равный диаметру пьезодиска. Принимается, что толщина электродов мала и поэтому не учитывается.

зеркала [17]. Рассматриваемая конструкция соответствует изготовленному образцу (рис. 1, з), который планируется использовать в ближайшее время.

При моделировании в качестве граничных условий задавалось жесткое закрепление зеркала на внешней образующей подложке. В данном случае такие граничные условия мало сказываются на величине прогиба подложки в области световой зоны при работе электродов зеркала. Однако жесткое закрепление существенно влияет на термомеханические характеристики зеркала и значения собственных частот колебаний.

В системе ANSYS была создана геометрия, заданы физические свойства материалов и построена конечно-элементная модель (КЭМ) рассматриваемого зеркала (рис. 1, б). Использовалась расчетная сетка, построенная методом Tetrahedrons (алгоритм Patch Conforming); задавался размер элемента в Use Advanced Size Function (On: Proximity and Curvature) равным 1 (параметр Num Cells Across Gap). Количество узлов сетки оказалось ~ 290000. Главные усредненные параметры качества расчетной сетки: Skewness = 0,27, Orthogonal Quality = 0,84. Такие значения характеризуют сетку как очень хорошую [19]. Дальнейшее измельчение сетки, как показали тестовые расчеты, не потребовалось. Тип заданного контакта между пьезодиском и подложкой – Bonded. На боковой поверхности подложки наложено граничное механическое условие Fixed Support.

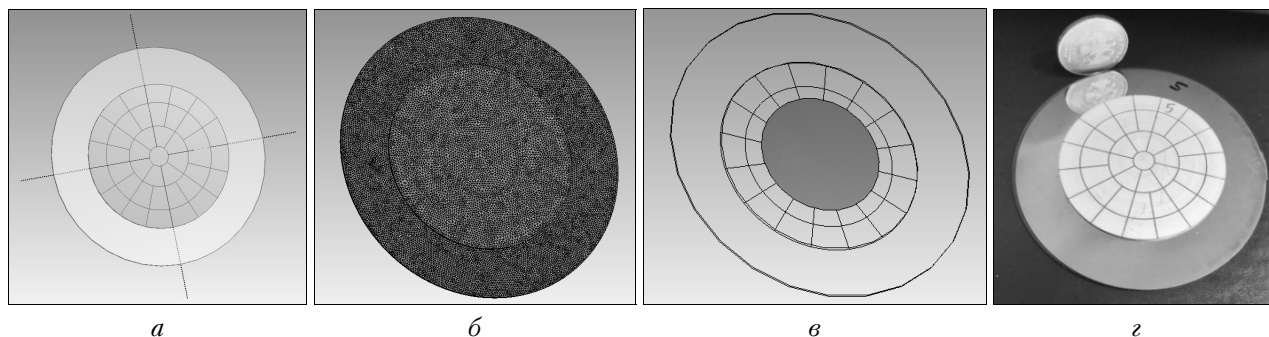


Рис. 1. Структура управляющих электродов зеркала (а); его конечно-элементная модель (б); световая зона (в); изготовленный экспериментальный образец (з)

Выбор такой конструкции зеркала связан с техническими возможностями изготовления его элементов, а также с предварительными оптимизационными расчетами. Толщины пьезодиска и подложки в дальнейшем планируется уменьшить до 0,5 и 0,3 мм соответственно. Диаметры подложки, пьезодиска и световой зоны определены конкретной задачей использования зеркала. Количество управляющих электродов и схема их расположения выбраны исходя из следующих соображений. С одной стороны, необходимо обрабатывать аберрации низких порядков с высокой точностью, а с другой – нужно, чтобы число приводов было невелико, иначе будет снижена эффективная рабочая площадь электродов из-за промежутков между ними в реальной модели

2. Функции влияния электродов и максимальный прогиб

Перед проведением расчетов прогиба мономорфного зеркала для проверки правильности численного расчета в системе ANSYS рассмотрим характерную задачу, имеющую аналитическое решение. Если есть круглый пьезомодуль для материала равен d_{31} с тонкими электродами на всей площади обеих поверхностей и приклеенная к нему подложка такого же диаметра, то в случае отсутствия закрепления при поданном напряжении V между электродами кривизна поверхности подложки [1]:

$$K_{\text{теор}} = -6d_{31}VE_1E_2t_2(t_1 + t_2)(v_1 - 1)(v_2 - 1) \times \\ \times \left[E_2^2t_2^4(v_1 - 1)^2 + 2E_1E_2t_1t_2(2t_1^2 + 3t_1t_2 + 2t_2^2) \times \right. \\ \left. \times (v_1 - 1)(v_2 - 1) + E_1^2t_1^4(v_2 - 1)^2 \right]^{-1},$$

где E_i — модули Юнга; t_i — толщины слоев; v_i — коэффициенты Пуассона; индекс $i = 1$ относится к материалу пьезодиска, 2 — к подложке зеркала (пассивному слою).

С другой стороны, из простых геометрических соображений, зная диаметр дисков D и стрелку прогиба поверхности w_{max} , можно получить значение кривизны этой поверхности по формуле

$$K = 8w_{\text{max}}/D^2.$$

Был проведен численный расчет для установления соответствия между формулами для теоретического значения $K_{\text{теор}}$ и значения, рассчитанного в ANSYS. Задавались следующие физические и геометрические параметры: $E_1 = 62$ ГПа, $E_2 = 130$ ГПа, $v_1 = 0,34$, $v_2 = 0,28$, $t_1 = 0,6$ мм, $t_2 = 0,5$ мм, $D = 50$ мм, $d_{31} = -260 \cdot 10^{-12}$ м/В, $V = 100$ В. При этом должно получиться $K_{\text{теор}} = 0,059$ м⁻¹.

Рассчитанное значение стрелки прогиба в ANSYS оказалось равным 17,7 мкм, что дает $K_{\text{ANS}} = 0,057$ м⁻¹. Отличие K_{ANS} от $K_{\text{теор}}$ составило ~3,5%. Такой результат свидетельствует о корректности моделирования при нахождении прогиба поверхности мономорфного зеркала вследствие обратного поперечного пьезоэффекта.

Для расчета функций влияния электродов на каждый из них в отдельности подается напряжение 100 В относительно отрицательного электрода. На приведенных на рис. 2 трехмерных графиках показаны характерные функции влияния на области световой зоны центрального электрода и электродов одного из каждых следующих колец. При этом по горизонтальным осям отложены расстояния в мм, а по вертикали — прогиб в мкм.

Чтобы создать максимальный прогиб поверхности зеркала, нужно одновременно подать пиковые значения электрических напряжений на все электроды (принято, что это ± 240 В). Результаты расчета прогиба поверхности зеркала на световой зоне для напряжения 240 В показаны на рис. 3. Прогиб по форме близко соответствует aberrации «Дефокус» со стрелкой прогиба $PV_{\text{max}} = 14,8$ мкм.

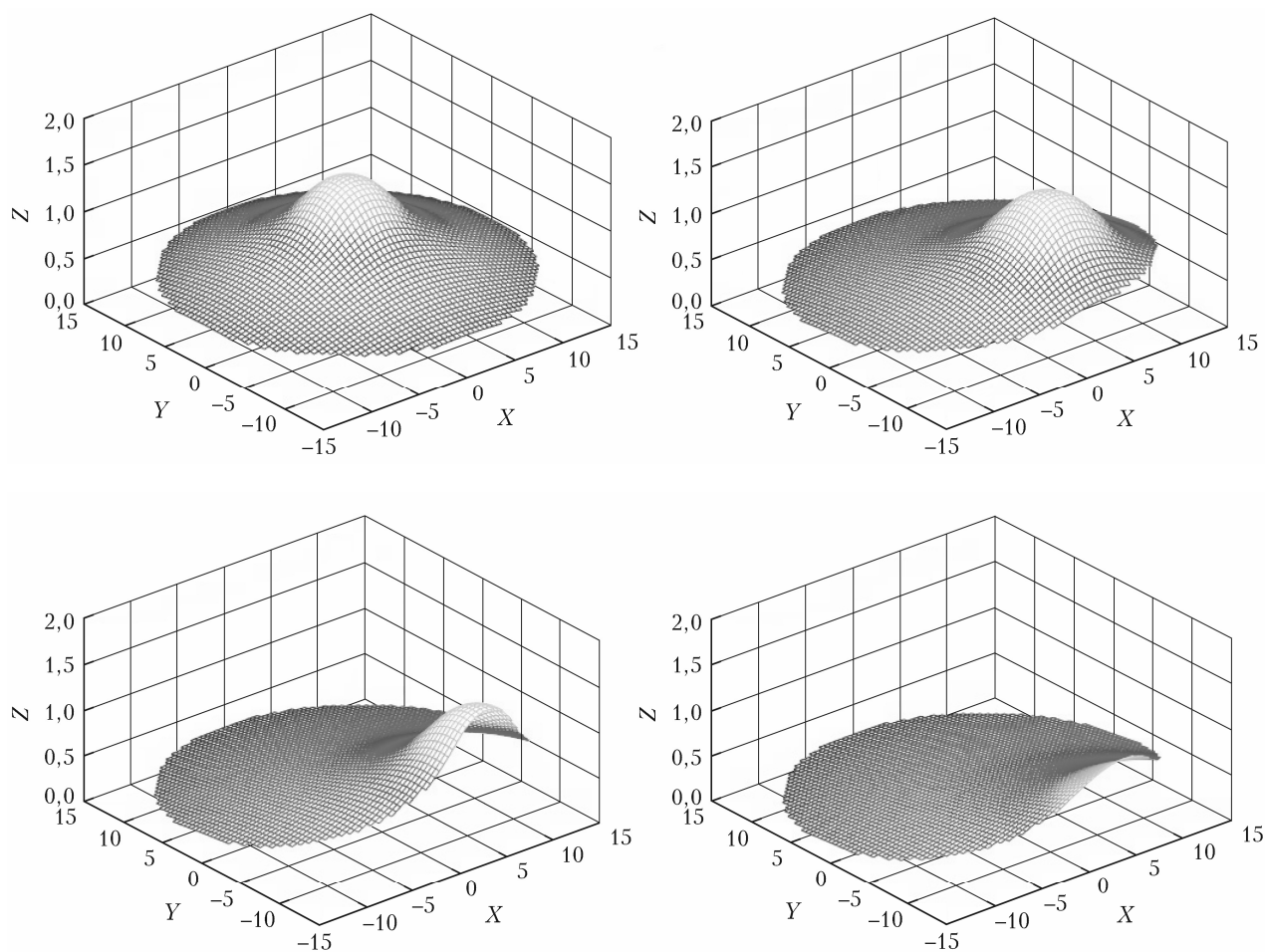


Рис. 2. Характерные функции влияния электродов зеркала

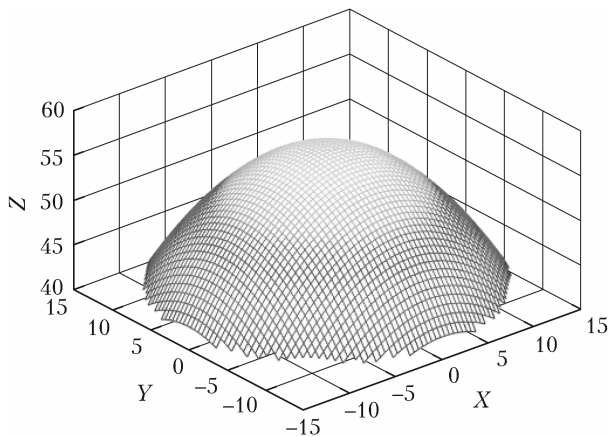


Рис. 3. Форма поверхности зеркала на световой зоне при подаче 240 В на все электроды

С учетом возможности подачи отрицательного напряжения размах прогиба данного зеркала составит 29,6 мкм.

3. Отработка заданных aberrаций и особенности управления зеркалом

На рис. 4 изображена гистограмма, показывающая, во сколько раз уменьшается значение среднеквадратического отклонения (СКО) для каждого

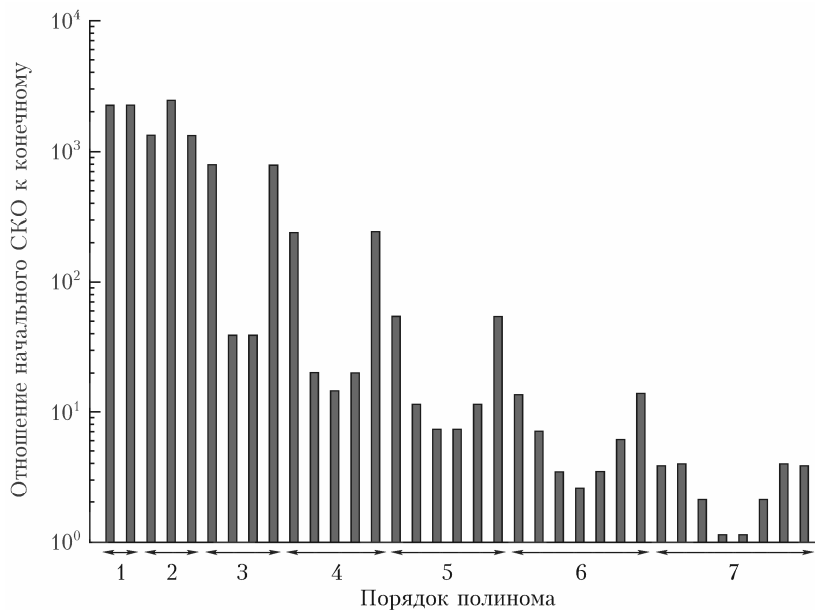


Рис. 4. Уменьшение СКО при отработке полиномов Цернике мономорфным зеркалом с 41 электродом; для каждого полинома начальный $PV = 1$ мкм

отдельного полинома Цернике при отработке зеркалом. На оси ординат значения приведены в логарифмическом масштабе. Видно, что такое мономорфное зеркало может с хорошей точностью исправлять aberrации 1–5 порядков и неплохо корректировать некоторые aberrации 6-го порядка.

Управление мономорфным зеркалом для отработки aberrаций имеет свою специфику. Если используемый для зеркала пьезоматериал допускает подачу напряжения как в положительную, так и в отрицательную сторону примерно в равных ам-

плитудах, тогда управление может быть усложнено в основном только гистерезисом [20]. Но далеко не все используемые пьезоэлектрические материалы позволяют прикладывать необходимые на практике значения напряжения в оба направления, так как приложение сильного электрического поля против направления поляризации пьезоэлектрика приводит к деполяризации последнего. Для получения больших прогибов мономорфного зеркала предпочтительно использовать «мягкую» пьезокерамику, однако она имеет меньший порог деполяризации [21, 22].

4. Термодеформации при изменении температуры окружающей среды и при нагреве от лазерного излучения

При изменении температуры окружающей среды происходит деформация поверхности зеркала. Для рассмотренного выше примера из разд. 2, если в формуле для $K_{\text{теор}}$ вместо $d_{31}V$ поставить $(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T t_1$, получится кривизна поверхности под-

ложки при изменении температуры окружающей среды на ΔT , где α_i – температурные коэффициенты линейного расширения слоев [1]. Значение стрелки прогиба при численном расчете в ANSYS при взятых $\alpha_1 = 2,2 \cdot 10^{-6} 1/\text{K}$ и $\alpha_2 = 2,6 \cdot 10^{-6} 1/\text{K}$ совпало с теоретическим значением с погрешностью

менее 1%. Далее вместо ΔT в Кельвинах будем использовать обозначение Δt в градусах Цельсия.

На рис. 5 изображены прогибы поверхности световой зоны рассматриваемого зеркала при $\Delta t = \pm 1^\circ\text{C}$. Видно, что поверхность приобретает профиль, близко соответствующий по форме aberrации «Дефокус» с $PV = 0,3$ мкм. В небольшом диапазоне изменения температур, когда физические константы принимают одно значение, такой прогиб линейно зависит от изменения температуры. Учитывая, что зеркало способно отработать эту форму aberrации с $PV_{\text{max}} = 14,8$ мкм, можно заключить, что при $\Delta t = \pm 49^\circ\text{C}$ этот прогиб можно будет скомпенсировать функциями влияния электродов.

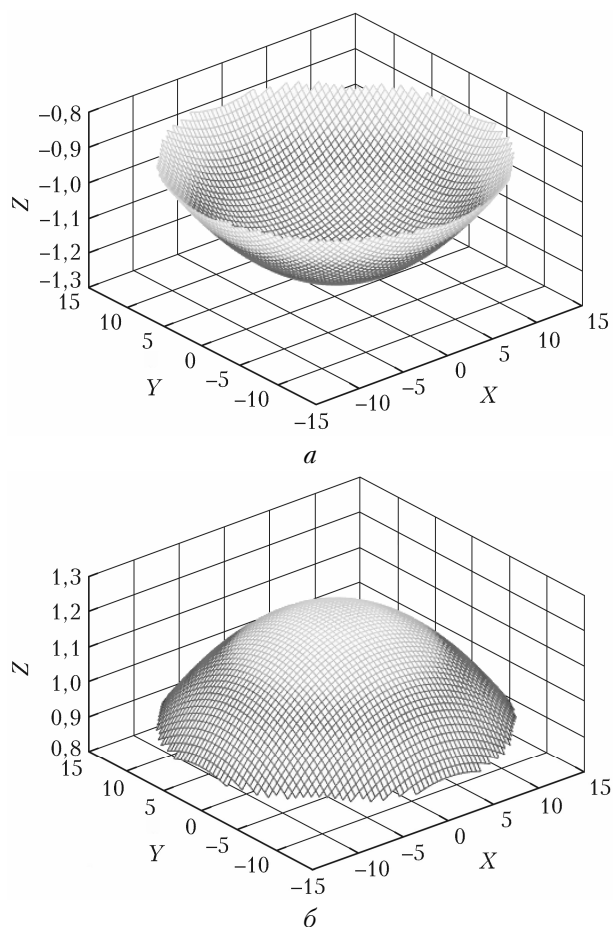


Рис. 5. Деформация поверхности при изменении температуры на 1°C : *a* – нагрев; *б* – охлаждение

Оптическая поверхность зеркала также может испытывать термодформации вследствие нагрева от падающего лазерного излучения. Такая ситуация была смоделирована. Во многих подобных задачах можно считать, что зеркало нагревается за счет проходящего теплового потока от поверхности световой зоны [23]. Для учета естественной конвекции на всех поверхностях зеркала был задан характерный коэффициент теплоотдачи. Значения параметров при расчете: мощность однородного теплового потока $Q = 2$ Вт, время воздействия $t = 100$ с, коэффициент теплоотдачи на всех гранях $\bar{h} = 5$ Вт/(м²·К);

начальная температура зеркала и температура окружающей среды – 20°C .

На рис. 6 представлены полученные результаты. Деформация поверхности зеркала имеет форму, близкую к aberrации «Дефокус» с $PV = 6,2$ мкм. Отсюда следует, что на компенсацию деформации оптической поверхности при нагреве зеркала от лазерного излучения в этом случае требуется ~40% максимальной амплитуды прогиба зеркала.

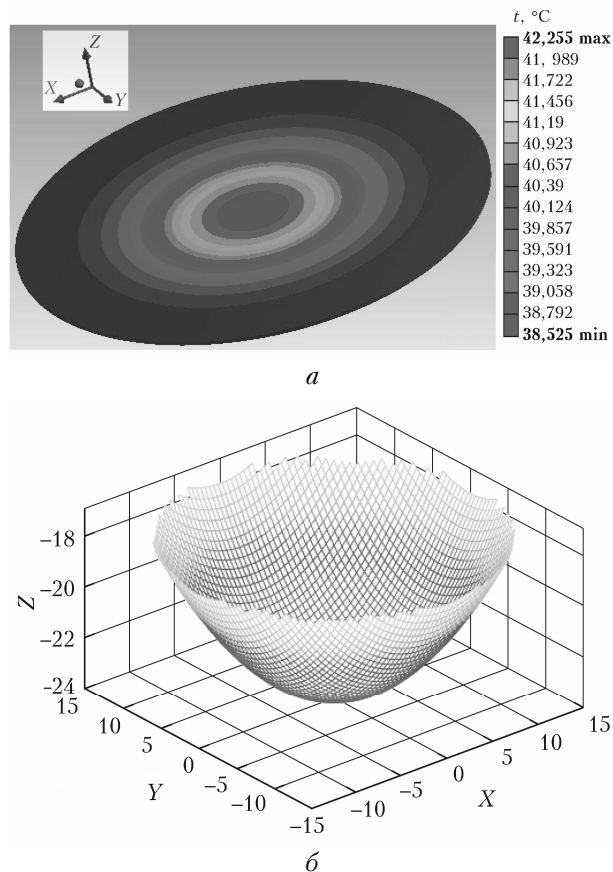


Рис. 6. Температурное поле при нагреве от лазерного излучения (*a*); соответствующий прогиб поверхности зеркала (*б*)

Отметим, что примерно такой же прогиб по амплитуде (но в противоположном направлении из-за того, что в данном случае $\alpha_1 < \alpha_2$) получается при свободно опертом крае подложки зеркала, $Q = 10$ Вт. Таким образом, подтверждается факт существенного влияния типа закрепления моноформного зеркала на его термомеханические свойства.

5. Прогиб под действием собственного веса

Был рассчитан прогиб поверхности зеркала под действием его собственного веса в поле тяжести Земли, когда внешняя образующая подложки имеет жесткое закрепление. На световой зоне значение прогиба, близкого по форме к aberrации «Дефокус», получилось равным 0,07 мкм.

6. Собственные частоты и моды колебаний зеркала

Рассчитаны собственные частоты и моды колебаний мономорфного зеркала. При таких граничных условиях оценка дает завышенное значение собственных частот, но может служить ориентиром. Первая собственная мода колебаний зеркала по своей форме близка к аберрации «Дефокус».

В таблице приведены значения частот первых десяти мод собственных колебаний зеркала.

Первые десять собственных частот мономорфного деформируемого зеркала

Номер моды	Частота, Гц	Номер моды	Частота, Гц
1	1120	6	4895
2	2352	7	6134
3	2352	8	6134
4	3927	9	8188
5	3927	10	8188

Заключение

С помощью системы ANSYS проведено численное моделирование мономорфного деформируемого зеркала. Рассчитаны все основные характеристики: функции влияния управляющих электродов, максимальный прогиб поверхности зеркала, точность отработки зеркалом заданных аберраций, термодформации отражающей поверхности при изменении температуры окружающей среды, температурное поле и термодформации при нагреве зеркала от падающего лазерного излучения, прогиб зеркала под действием собственного веса, значения собственных частот колебаний зеркала.

Это мономорфное зеркало с высокой точностью воспроизводит полиномы Цернике 1–5 порядков и может исправить свою форму при изменении температуры окружающей среды в диапазоне $\Delta t = \pm 49^\circ\text{C}$. Для тепловой нагрузки в $Q = 2$ Вт на компенсацию термодформаций требуется ~40% возможного прогиба зеркала. При свободном опирании края зеркала тепловая нагрузка может увеличиться до $Q_{\text{lim}} = 10$ Вт. Первая собственная частота колебаний зеркала $f_1 = 1120$ Гц.

Выполненное численное моделирование позволяет оптимизировать конструкцию мономорфных зеркал. Дальнейшее улучшение характеристик зеркал может быть связано с развитием конструкции (использование более тонких слоев, улучшение условий крепления) и использованием новых монокристаллических материалов PMN-PT, PZN-PT с существенно увеличенным поперечным пьезомодулем d_{31} [24].

1. *Ellis E.M.* Low-cost Bimorph Adaptive Mirrors: Ph.D. dissertation. Imperial College of Science, Technology and Medicine – University of London, 1999. 170 p.
2. *Roddier F.* Adaptive Optics in Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 441 p.

3. *Токовинин А.А.* Лекции по адаптивной оптике. URL: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/> (дата обращения: 22.12.2019).
4. *Cousty R., Antonini T., Aubry M., Krol H., Moreau A.* Monomorph deformable mirrors: From ground-based facilities to space telescopes // Proc. SPIE. 2016. V. 10562. P. 1056231-9.
5. *Verpoort S., Rausch P., Wittrock U.* Novel unimorph deformable mirror for space applications // Proc. SPIE. 2017. V. 10564. P. 1056414.
6. *Alaluf D., Bastais R., Wang K., Horodincă M., Martić G., Mokrani B., Preumont A.* Unimorph mirror for adaptive optics in space telescopes // Appl. Opt. 2018. V. 57, N 14. P. 3629–3638.
7. *Jones S.M., Olivier S., Chen D., Joeres S., Sada S., Rukosuev R.J., Werner J.S., Miller D.T.* Adaptive optics ophthalmologic systems using dual deformable mirrors // Proc. SPIE. 2007. V. 6467. P. 6470H-1–14.
8. *Long C.S., Loveday P.W., Forbes A.* A piezoelectric deformable mirror for intra-cavity laser adaptive optics // Proc. SPIE. 2008. V. 6930. P. 69300Y-1–12.
9. *Verpoort S., Rausch P., Wittrock U.* Characterization of a miniaturized unimorph deformable mirror for high power cw-solid state laser // Proc. SPIE. 2012. V. 8253. P. 825309-1–12.
10. *Aleksandrov A.G., Zavalova V.E., Kudryashov A.V., Rukosuev A.L., Samarkin V.V.* Adaptive correction of a high-power titanium-sapphire laser radiation // J. Appl. Spectrosc. 2005. V. 72, N 5. P. 744–750.
11. *Копылов Е.А., Лукин В.П.* Статические характеристики биморфного зеркала DM2-100-31 и возможность его применения в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1111–1113.
12. *Ma J., Liu Y., Hu Y., Xu C., Li B., Chu J.* Low-cost unimorph deformable mirror with high actuator count for astronomical adaptive optics // Opt. Eng. 2013. V. 52, N 1. P. 016602.
13. *Rausch P., Verpoort S., Wittrock U.* Unimorph deformable mirror for space telescopes: Environmental testing // Opt. Express. 2016. V. 24, N 2. P. 1528–1542.
14. *Alaluf D.* Piezoelectric mirrors for adaptive optics in space telescopes: Ph.D. thesis. Université Libre de Bruxelles, Active Structures Laboratory, 2016. 151 p.
15. *Соболев А.С., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В.* Аналитическая и численная модели гибкого биморфного зеркала // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 3. С. 277–281.
16. *Ning Y., Jiang W., Ling N., Rao C.* Response function calculation and sensitivity comparison analysis of various bimorph deformable mirrors // Opt. Express. 2007. V. 15, N 19. P. 12030–12038.
17. *Verpoort S., Wittrock U.* Actuator patterns for unimorph and bimorph deformable mirrors // Appl. Opt. 2010. V. 49, N 31. P. G37–G46.
18. *Piefort V.* Finite element modelling of piezoelectric active structures: Ph.D. dissertation. Université Libre de Bruxelles, 2001. 154 p.
19. URL: https://www.academia.edu/16970000/MESH_QUALITY_AND_ADVANCED_TOPICS_ANSYS_WORKBENCH_16.0 (last access: 22.12.2019).
20. *Kudryashov A., Shmalhauzen V.* Semipassive bimorph flexible mirrors for atmospheric adaptive optics applications // Opt. Eng. 1996. V. 35, N 11. P. 3064–3073.
21. *Никифоров В.Г.* Многослойные пьезоэлектрические актюаторы. Теория и практика // Элпа. 68 с.
22. *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications.* 2nd. ed. APC International, 2011. 114 p.

23. Харитонов В.В. Теплофизика лазерных зеркал. М.: МИФИ, 1993. 152 с.
24. Ivan I.A., Rakotondrabe M., Agnus J., Bourquin R., Chaillet N., Lutz P., Poncot J.C., Duffait R., Bauer D.

Comparative material study between PZT ceramic and newer crystalline PMN-PT and PZN-PT materials for composite bimorph actuators // Rev. Adv. Mater. Sci. 2010. N 24. P. 1–9.

D.A. Yagnyatinskiy, V.N. Fedoseyev. Numerical simulations of the monomorph deformable mirror in ANSYS software.

Based on the numerical simulations in ANSYS software the design of the monomorph (unimorph) deformable mirror has been developed. The control electrodes pattern, which allows reproducing aberrations up to 5th order (the first 21 Zernike modes) on the light aperture with high fidelity, was chosen. All important characteristics of the monomorph mirror were calculated: electrodes influence functions, reproduction errors of the given aberrations, gravitational sag of the mirror, mirror surface deformation due to ambient temperature changing, thermal deformations and thermal field due to the incident laser beam, and natural frequencies of the mirror. The results show a possibility of the effective use of this mirror as an element of adaptive optics systems.