

УДК 536.242; 621.03

Влияние технологических дефектов и эксплуатационных условий на работоспособность деформируемых зеркал

А.В. Черных¹, Ю.И. Шанин²

¹ *Институт лазерно-физических исследований «Российского федерального ядерного центра Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»*

(ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), Саров, 607188, Россия

² *Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение «ЛУЧ»*

(ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»), Подольск, 142103, Россия

e-mail: syi@luch.com.ru

Поступила в редакцию 28.05. 2019

После доработки 29.07.2019

Принята к публикации 29.07.2019

Рассмотрены вопросы обеспечения работоспособности деформируемых зеркал в составе импульсных и непрерывных лазерных установок как в процессе их изготовления, так и при их эксплуатации. Оценены критические размеры возможных дефектов оптической поверхности и покрытия с точки зрения достижения ограничений по температуре, напряжению или перемещению. Рассмотрены вопросы обеспечения стабильности оптической поверхности зеркала при различных тепловых воздействиях на него. Рассмотрены параметры стабильности материалов, применяемых при изготовлении неохлаждаемых оптических элементов.

Ключевые слова: лазерное зеркало, деформируемое зеркало, оптический элемент, импульсная мощная лазерная установка, лазерная установка, температура, тепловой поток.

Введение

На сегодняшний день создание большеразмерных телескопов, технологических лазерных установок немислимо без применения в них адаптивной оптики. Главный элемент адаптивной оптической системы – деформируемое зеркало, с помощью которого исправляется аберрированный волновой фронт излучения. Сегодня еще удается обходиться неохлаждаемыми оптическими элементами (включая деформируемое зеркало) как при создании импульсных мощных лазерных установок для инерционного термоядерного синтеза, так и непрерывных технологических лазерных установок. Это позволяют сделать технологии нанесения на оптическую поверхность многослойных четвертьволновых отражающих покрытий, одновременно обеспечивающими высокий коэффициент зеркального отражения оптической по-

верхности зеркала и их высокую лучевую стойкость.

Деформируемое зеркало состоит из трех компонентов: оптического блока с зеркальной отражающей оптической поверхностью (подложка), основы и приводов. Приводы (как правило, это пьезоэлектрические актюаторы) через толкатели крепятся к оптическому блоку и к основе с помощью клея и служат для управления формой оптической поверхности зеркала. Основа обеспечивает жесткость конструкции и во многом определяет оптическую стабильность оптической поверхности.

Имеется опыт создания широкоапертурных квадратных зеркал для установок лазерного термоядерного синтеза: в США для установки NIF с деформируемым зеркалом, имеющим размеры оптической поверхности 400×400 мм [1]; в России для действующей установки «Луч»

(200×200 мм) [2] и импульсной мощной лазерной установки [3].

Создание широкоапертурного деформируемого (адаптивного) зеркала требует применения продвинутых технологий и является весьма затратным. К качеству оптической поверхности предъявляются высокие требования, не всегда успешно достижимые на имеющемся оборудовании. Проблемой может стать получение плоской поверхности на большой апертуре. Опыт показывает, что даже качественная плоская оптическая поверхность, полученная после шлифования, может существенно искажаться в ходе дальнейших технологических переделов. Например, отражающая поверхность оптического блока зеркала, как правило, теряет свою начальную плоскую форму при нанесении на нее отражающих покрытий и приклейке приводов. На готовой поверхности могут быть незначительные дефекты (пятна, царапины) или же могут быть дефекты покрытия. Важно знать критические размеры таких дефектов, превышение которых может приводить зеркало к различным повреждениям, вплоть до выхода из строя.

Поэтому получение качественной оптической поверхности в процессе производства зеркала и поддержание оптической стабильности этой поверхности в процессе эксплуатации зеркала является актуальной задачей.

В статье рассмотрено влияние некоторых технологических дефектов, встречающихся при изготовлении элементов деформируемого зеркала, и условий, которые могут иметь место при эксплуатации зеркала и влиять на его работоспособность. Обращено внимание на реализованный способ уменьшения неплоскостности исходной оптической поверхности зеркала в процессе проведения механической и автоматической юстировки поверхности [3]. Влияние возможных дефектов в поверхностном и приповерхностном слоях рассмотрено с точки зрения определения их критических размеров при ограничениях по температуре, напряжению или перемещению оптической поверхности. Рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением стабильности оптической поверхности:

- температурной стабильности, когда изменяется температура окружающей среды;
- тепловой – при воздействии на оптическую поверхность лазерного излучения или разогрева

основы зеркала из-за импульсного воздействия излучения от ламп накачки;

- стабильности, связанной с приводами (при выходе их из строя и при их нагреве и термическом расширении в процессе работы).

Так как геометрическая стабильность оптической поверхности зеркала является прямым следствием теплофизических и физико-механических свойств материала зеркала, то рассмотрен выбор наилучших материалов для зеркал с точки зрения обеспечения максимальных значений так называемых параметров стабильности [4, 5].

1. Обеспечение работоспособности при изготовлении деформируемых зеркал

1.1. Обеспечение плоскостности оптической поверхности деформируемых зеркал механической юстировкой

Как достичь высокого качества оптической поверхности деформируемых зеркал при существенном упрощении технологии их изготовления? Очевидно, можно существенно уменьшить требования к форме оптической поверхности на всех этапах изготовления зеркала, а получение кондиционной формы перенести на финишную операцию механической юстировки поверхности. Конструкция зеркала должна позволять осуществление быстрой ручной юстировки. Накопленный опыт [3] показал, что удовлетворительные результаты получаются в конструкциях, у которых край подложки свободен или находится достаточно далеко от внешнего кольца приводов деформируемого зеркала. Конструкционные решения не должны приводить к сильным локальным изменениям формы поверхности при существенных ее перемещениях, обеспечивая необходимую точность при механической юстировке.

При изготовлении макетных плоских оптических пластин для широкоапертурного деформируемого зеркала импульсной лазерной установки (характерные размеры 220×220×5 мм³) форма поверхности после полировки существенно отличалась от плоскости за счет заваленных краев [3]. Нанесение высокопрочного отражающего покрытия приводило к дополнительному искажению формы поверхности. Дальнейшие технологические операции только усугубляли ситуацию.

Благодаря разработанному модифицированному методу Гартмана контроля формы оптической поверхности в реальном масштабе времени и реализации оптимального алгоритма управления [6] удалось получить приемлемое качество формы оптической поверхности путем механической юстировки формы поверхности как в ручном, так и в автоматическом режиме [3].

Механическая юстировка типичной поверхности с круглой или квадратной апертурой и числом приводов от 31 до 61 [3] занимала от получаса до двух часов и проводилась за 3–6 итераций. Электронная юстировка позволила получить при начальной амплитуде отклонения поверхности от плоскости 2.39 мкм и среднеквадратичном отклонении (СКО) 0.473 мкм конечные отклонения – 0.35 мкм и СКО – 0.026 мкм. Проведенная оценка механических напряжений, возникающих в соединениях и элементах конструкции в результате механической коррекции, показала их малую величину (возникающие силы были порядка сотен ньютонов).

1.2. Покрyтия: обеспечение лучевой прочности

Одним из важных технических требований, предъявляемых к зеркалу, является требование лучевой прочности наносимых многослойных диэлектрических покрытий. Оптическое покрытие для деформируемых зеркал импульсных мощных лазерных установок должно обладать коэффициентом зеркального отражения не менее 99.5% и коэффициентом пропускания в диапазоне (0.2–0.5)% [1]. О достигнутых уровнях величин лучевой прочности применительно к таким лазерным установкам сообщено в работе [7].

Существенные искажения оптической поверхности из-за нанесения многослойных покрытий удастся уменьшить нанесением на тыльную сторону подложки зеркала компенсирующего покрытия.

Лучевая прочность оптических покрытий может быть повышена лазерным кондиционированием или упрочнением. Например, при воздействии на многослойное покрытие импульсного (~ 10 нс) лазерного из-

лучения с околороговыми значениями повреждаемости происходит (2–3)-кратное повышение порога повреждаемости [8].

1.3. Определение критических размеров дефектов оптической поверхности

К поверхности оптических элементов и лазерных зеркал предъявляются высокие требования, так как ее несовершенства (возможные дефекты) приводят к локальному повышению температуры за счет местного увеличения поглощения световой энергии. В ограниченной области поверхности возможна концентрация термонапряжений, появление пластических деформаций и даже плавлений материала.

Под дефектом оптической поверхности зеркала будем понимать область, имеющую коэффициент зеркального отражения меньший, чем на всей остальной части поверхности. Это могут быть «грязные» пятна или царапины.

В предположении о равномерном распределении коэффициента зеркального отражения в области дефекта и малости дефекта, приводящих к допущению о рассмотрении зеркала как полупространства, в [5] получены формулы для критических размеров дефектов – радиуса дефектной области $R_{кр}$ (табл. 1).

Царапины моделируются прямоугольником со сторонами a и b , причем $a \gg b$. Моделированием задачи только по тепловому признаку установлено следующее соотношение между размерами царапины [5] и критической температурой $T_{кр}$:

$$b \ln \frac{2a}{b} = \frac{\pi \lambda T_{кр}}{2q}, \quad (4)$$

т.е. чем тоньше царапина, тем более длинной она может быть.

Таблица 1. Критические размеры дефектов, определенные по различным признакам

Критерий	Формула	Примечание
Критическая температура $T_{кр}$	$R_{кр} = \frac{\lambda T_{кр}}{q} \quad (1)$	Например, $T_{кр}$ – температура фазового перехода или плавления
Критическое напряжение σ_0	$R_{кр} = \frac{2\lambda\sigma_0}{\beta E q} \quad (2)$	Например, $\sigma_0 = \sigma_{0.01}$
Предельное искажение формы оптической поверхности $W_{кр}$	$R_{кр} = \sqrt{\frac{4\lambda W_{кр}}{\beta(1+\nu)q}} \quad (3)$	Например, $W_{кр} = (1/20-1/10)\eta$, где η – длина волны лазерного излучения

Примечание: q – тепловой поток, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); β – коэффициент линейного расширения материала, 1/К; E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона.

1.4. *Определение критических размеров дефектов покрытий*

В данном случае под дефектом покрытия будем понимать малую круглую область («пятно» радиусом $R_{п.к}$) покрытия толщиной $\delta_{п}$, в которой нарушена сплошность контакта между покрытием и поверхностью оптического элемента, и эта область подвергается действию постоянного теплового потока $q_{т}$. Полагаем, что в области дефекта имеется скачок температуры ΔT . Решение двумерной стационарной задачи теплопроводности дает распределение температуры в окрестностях дефекта [5, 9], которое здесь дано применительно к нахождению поверхностной максимальной температуры $T_{кр}$ (например, температуры плавления или размягчения материала оптического элемента) и имеет место уравнение:

$$\rho_0 \int_0^{\infty} \frac{ch\mu J_1(\mu\rho_0)}{ch\mu(1+\varepsilon)} d\mu = \frac{1}{\Delta T} \left[T_{кр} - \frac{q_{т}H}{\lambda_{м}} \left(\frac{\lambda_{м}}{\lambda_{п}} + \varepsilon \right) \right], \quad (5)$$

где $\rho_0 = R_{п} / H$; $\varepsilon = \delta_{п}/H$ – относительная толщина покрытия; H – толщина оптического элемента, м; J_1 – функция Бесселя 1-го рода и порядка; $\lambda_{м}$, $\lambda_{п}$ – коэффициенты теплопроводности соответственно материалов подложки зеркала и покрытия, Вт/(м·К); μ – переменная интегрирования.

Для современных оптических покрытий с характерной относительной толщиной ε от 10^{-3} до 10^{-2} и при $\rho_0 > 0.1$ интеграл в левой части (5) равен ≈ 1 и критические размеры дефектов по тепловому признаку определяются из неравенства

$$\frac{1}{\Delta T} \left[T_{кр} - \frac{q_{т}H}{\lambda_{м}} \left(\frac{\lambda_{м}}{\lambda_{п}} + \varepsilon \right) \right] < 1, \quad (6)$$

а сделанные выше допущения позволяют также аппроксимировать подынтегральную функцию в левой части (5) выражением $[chJ_1(\mu\rho_0)]/[ch\mu(1+\varepsilon)] \approx \exp(-\mu\varepsilon)J_1(\mu\rho_0)$ и определить в явном виде формулу для $R_{п.к}$ при $\lambda_{м} = \lambda_{п} = \lambda$:

$$R_{п.к} = \delta_{п} \times \sqrt{\frac{1 - \{1 - (1/\Delta T)[T_{кр} - (q_{т}H/\lambda)(1+\varepsilon)]\}}{\{1 - (1/\Delta T)[T_{кр} - (q_{т}H/\lambda)(1+\varepsilon)]\}}}, \quad (7)$$

где $T_{кр}$ должна превышать максимальное значение температуры в системе «покрытие – оптический элемент» при отсутствии дефекта.

Критический размер дефекта по прочностному признаку может быть оценен из уравнения [5]:

$$R_{п.к} = \delta_{п} \sqrt{0.35 / [q_{т}H(\beta_{п} - \beta_{м}) / \lambda + \beta_{п}\Delta T]}, \quad (8)$$

где $\beta_{п}$, $\beta_{м}$ – коэффициенты линейного расширения материалов покрытия и оптического элемента, 1/К.

Эта формула позволяет оценить влияние разности температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) β материалов покрытия и подложки, а также теплового сопротивления в дефекте (проявляется через ΔT) на величину критического размера. Из нее следует, что наибольшие значения допустимых размеров дефектов имеют покрытия из материалов, ТКЛР которых меньше, чем у материала оптического элемента. Материал покрытия необходимо выбирать из условия минимума знаменателя подкоренного выражения в формуле (8).

Учет остаточных напряжений σ_0 в покрытии приводит к более полной и правильной формуле для оценки размера допустимого дефекта [5]:

$$R_{п.к} = \delta_{п} \times \sqrt{0.35 / [q_{т}H(\beta_{п} - \beta_{м}) / \lambda + \sigma_0 / E + \beta_{п}\Delta T]}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что ограничения на дефекты покрытий по прочностному признаку являются более жесткими по сравнению с ограничениями по тепловому признаку.

1.5. *Влияние пор в приповерхностном слое*

Наличие пор (например, небольших пузырьков газа) в приповерхностном слое оптического элемента приводит к перераспределению тепловых потоков из-за различий в теплопроводности среды поры и материала элемента, приводящее к повышению температуры на участках поверхности и снижению рабочих характеристик оптики. Влияние поровых дефектов рассмотрим как решение задач теплопроводности для полупространства, подвергаемого нагреву тепловым потоком, распределенным по закону Гаусса, когда поры нет и когда имеется сферическая пора радиуса R .

В работе [5] решена модельная задача теплопроводности для полупространства со сферической порой радиуса R , центр которой находится на расстоянии z_0 от поверхности полу-

пространства. Полупространство нагревалось тепловым потоком, распределенным по закону Гаусса, а пора была теплоизолирована. Это дает предельную оценку ее влияния на искажение поля температуры.

Не останавливаясь на ходе решения, приведем лишь результаты некоторых оценок. Для сферической поры $R = 0.5$ мм и $z_0/R = 1.1 - 10$ получено, что превышение максимальной температуры на поверхности полупространства со сферической порой может быть весьма значительным по сравнению с максимальной температурой поверхности полупространства без поры. Для поры, приближенной к оптической поверхности на расстояние $z_0/R = 1.1$, превышение температуры может достигать до 50 раз [5]. Таким образом, поры в материалах лазерных зеркал, особенно вблизи оптической поверхности, практически недопустимы.

2. Обеспечение работоспособности при эксплуатации деформируемых зеркал

2.1. Динамическое воздействие импульсной лазерной нагрузки

При взаимодействии ультракоротких лазерных импульсов с оптической поверхностью оптических элементов (в частности деформируемых зеркал для импульсных мощных лазерных установок) необходимо учитывать динамические эффекты (конечность скорости распространения тепла и динамику упругого деформирования). Для анализа рассмотрим результат решения упрощенной модельной задачи [5]. Полупространство $x \geq 0$ подвергается нагреву тепловым потоком постоянной плотности q_0 в течение времени t_0 , начальная температура полупространства предполагается равной нулю. Температурное поле находится из решения дифференциального уравнения

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} + t_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}, \quad (10)$$

удовлетворяющего краевым условиям

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q + t_r \frac{\partial q}{\partial t}, \quad T \Big|_{x=\infty} = 0, \quad T \Big|_{t=0} = 0, \quad (11)$$

где $q(t)$ имеет вид ступеньки: $q(t) = q_0 [\theta(t) - \theta(t - t_0)]$; $\theta(t)$ – единичная функция Хэвисайда; t – время, с; t_r – время ре-

лаксации теплового потока, связанное со скоростью распространения тепла ω_r , выражением $t_r = a / \omega_r^2$, a – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$. Решение безразмерного уравнения (10) получено преобразованием Лапласа. Нас будет интересовать максимальное значение температуры, которое достигается на оптической поверхности в конце импульса, т.е. при $\tau = \tau_0 = at_0 / R_{\text{п}}^2$

$$T_{\max} = \frac{aq_0}{\lambda\omega_r} \{ \tau_0 \exp(-0.5\tau_0) \times \\ \times [I_0(0.5\tau_0) + I_1(0.5\tau_0)] + \\ + \exp(-0.5\tau_0) I_0(0.5\tau_0) \}, \quad (12)$$

где I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

Если τ_0 мало ($t_0 \ll t_r$), то в соответствии с асимптотическими представлениями функций Бесселя для малого аргумента получим

$$T_{\max} \approx \frac{aq_0}{\lambda\omega_r} = \frac{q_0 \sqrt{t_r}}{\sqrt{\lambda c_p \rho}}, \quad (13)$$

где c_p – теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Приравнявая (13) к некоторой критической температуре $T_{\text{кр}}$, найдем значение критического теплового потока

$$q_{\text{кр}} = \frac{T_{\text{кр}} \sqrt{c_p \lambda \rho}}{\sqrt{t_r}}. \quad (14)$$

Применительно к адаптивному зеркалу импульсной мощной лазерной установки оценим T_{\max} для подложки зеркала толщиной 5 мм, изготовленной из ситалла ($\lambda_m = 1.98$ Вт/(м·К), $c_p = 920$ Дж/(кг·К), $\rho = 2460$ $\text{кг}/\text{м}^3$). Энергия в одном канале – 14.6 кДж. Время импульса – 3 нс. Коэффициент зеркального отражения оптической поверхности – 0.993. Тепловой поток в оптическую пластину деформируемого зеркала равен $\sim 22 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Время релаксации t_r является физическим параметром материала и оценивается по формуле $t_r = 3a / c^2 \approx 1.8 \cdot 10^{-13}$ с [10], где c – скорость звука в ситалле. Тогда из (13) получим $T_{\max} \approx 44.5$ К.

2.2. Обеспечение стабильности формы оптической поверхности

В процессе эксплуатации деформируемых зеркал важно поддерживать их работоспособ-

ность, которая определяется стабильностью оптической поверхности зеркала при воздействии различных факторов. Как в импульсных, так и в непрерывных лазерных установках можно выделить следующие виды воздействий на зеркало, а, следовательно, и на его оптическую поверхность, при которых должна быть обеспечена ее стабильность:

- изменение температуры окружающей лазерную установку среды (необходимо обеспечить температурную стабильность);

- изменение температуры оптического элемента при импульсной накачке или при работе лазера в непрерывном режиме (необходимо обеспечить тепловую стабильность);

- долгосрочное нахождение приводов деформируемого зеркала под напряжением (необходимо обеспечить стабильность формы во времени);

- приводы в процессе работы могут выйти из строя или излишне разогреться (необходимо обеспечить стабильность от воздействий приводов).

2.2.1. Температурная стабильность

Температурная стабильность формы поверхности исследовалась при изменении температуры среды, в которой находилось зеркало и его юстировочный узел. Для конструкций зеркал, разработанных для установки «Луч», достигнута практически полная температурная стабильность при изменении температуры окружающей среды в диапазоне пяти градусов от установленного эксплуатационного уровня температуры. Например, для одного из макетов деформируемого зеркала установлена незначительная зависимость среднеквадратичного отклонения поверхности от температуры [3]: $СКО_{\text{п}} = 0.0155t + 0.162$ мкм, здесь t – уровень температуры в °С. Изменение $СКО_{\text{п}}$ при изменении температуры на 0.25 К (уровень дрейфа температуры окружающей среды в установке «Луч») составляет ~ 0.004 мкм ≈ 0 .

2.2.2. Тепловая стабильность

О тепловой стабильности оптической поверхности будем говорить при воздействии на нее либо импульсной (лампы засветки, лазерный импульс), либо непрерывной тепловой нагрузки (непрерывный лазер).

При воздействии лазерного излучения на оптический элемент часть излучения: а) отражает-

ся от оптической поверхности; б) поглощается в приповерхностном слое; в) поглощается по толщине элемента; г) проходит через оптический элемент. Поглощенный тепловой поток приводит к разогреву неохлаждаемого оптического элемента. Ввиду небольшой характерной толщины оптических элементов деформируемого зеркала (3–10 мм) время прохождения тепловой волны до противоположной от теплового потока поверхности сравнительно небольшое $\sim (0.05–0.1)$ с. При числах $Fo > 0.3$ (где $Fo = a\tau/H^2$ – число Фурье, τ – время, a – температуропроводность материала, H и D – толщина и условный диаметр оптического элемента) в основном изменяется средняя температура оптического элемента, а профиль температуры по толщине остается практически неизменным, и поэтому максимальное перемещение оптической поверхности за счет изгиба оптического элемента приближается к асимптотическому значению:

$$W_{\text{изг}}^{\text{max}} = \frac{1}{16} \frac{\beta}{\lambda} q D^2. \quad (15)$$

Заметим, что частичное прохождение излучения через оптический элемент (проходная оптика) и его частичное, правильно подобранное с помощью какого-либо поглощающего покрытия поглощение на обратной стороне элемента (термокомпенсация) позволяют управляемо уменьшать (вплоть до нуля) его изгибные деформации. Правда, при этом вдвое увеличивается разогрев оптического элемента и при необходимости нужно принимать дополнительные меры по тепловой развязке крепления элемента в оправы.

В импульсных мощных лазерных установках свет накачки от ксеноновых ламп может проходить через оптическую пластину деформируемого зеркала и попадать на основу зеркала. Эта энергия может воздействовать как на клеевые соединения, так и на элементы конструкции.

Плотность энергии светового потока может достигать ~ 10 Дж/см² [1], до 10% от нее может поглощаться основой зеркала. Оценим динамику температурного поля и изгиба основы из инвара для деформируемого зеркала установки «Луч» [3]. На рис. 1 приведены кривые 1–3 изменения температуры по толщине основы из инвара по времени на расстояниях 0.01, 0.1 и 0.4 мм от поверхности соответственно при воздействии импульса длиной 200 мкс потока теп-

ловой энергии с плотностью 1 Дж/см^2 . Видно, что на поверхности температура достигает $\sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$, а на глубине 0.4 мм за это время (200 мкс) температура практически не изменяется. Максимальное отклонение поверхности составило $\sim 0.2 \text{ мкм}$. Аналогичные расчетные оценки были проделаны для основы в виде алюминиевой плиты с размерами $440 \times 440 \times 100 \text{ мм}$ (аналогично прототипам зеркал установок NIF и LMJ). На рис. 2 приведены кривые 1–3, отражающие динамику поведения температуры на поверхности основы зеркала и на расстояниях 1 и 5 мм при аналогичных условиях нагружения основы зеркала. Видно, что на поверхности температура достигает $\sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$, а на глубине 1 мм за это время (200 мкс) температура практически не изменяется. Максимальное отклонение поверхности под воздействием вспышки света составляет $\sim 2 \text{ мкм}$. В условия характерного для данных установок прохождения лазерного излучения указанные отклонения увеличатся в четыре раза и составят существенную и вредную величину, так как вносимые аберрации приводят к расфокусировке излучения. Для исключения негативного воздействия вспышки света от ламп на конструкцию в зеркале установки NIF между лицевой пластиной и силовой основой установлен экран.

2.2.3. Стабильность удержания формы поверхности во времени

Для выяснения вопроса о стабильности удержания формы поверхности без напряжения на приводах и под напряжением (на всех приводах 100 В) в течение двух часов была поставлена специальная серия экспериментов для деформируемого зеркала установки «Луч» (размер оптической поверхности $220 \times 220 \text{ мм}$) [3]. Интерферограммы оптической поверхности снимались с периодом 20 мин . В процессе эксперимента отклонения в СКО изменялись в пределах 0.032 мкм , имелась слабая линейная зависимость от времени $\text{СКО}_n(t) - \text{СКО}_n(t=0) = at$, где $a = (2.0 \cdot 10^{-5} - 1.57 \cdot 10^{-4}) \text{ мкм/мин}$, t – время, мин. Данный макет зеркала показал высокую временную стабильность оптической поверхности.

2.3. Влияние приводов

2.3.1. Влияние вышедших из строя приводов

При работе деформируемого зеркала могут происходить различные нештатные ситуации, в результате которых привод перестает воз-

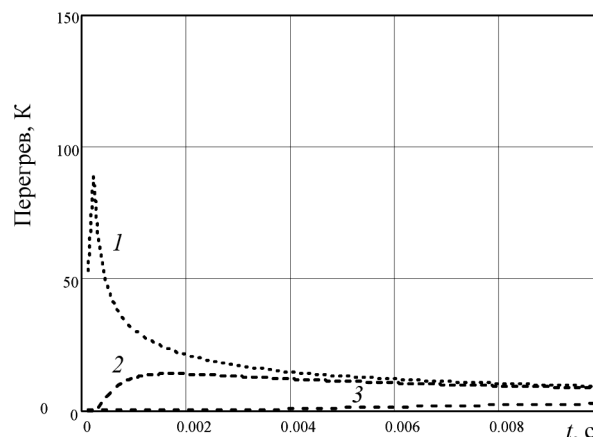


Рис. 1. Динамика изменения температуры в различных точках силовой основы для установки «Луч»: плита основы $240 \times 240 \times 20 \text{ мм}$ из инвара (1 – расстояние от поверхности 0.01 , 2 – 0.1 , 3 – 0.4 мм)

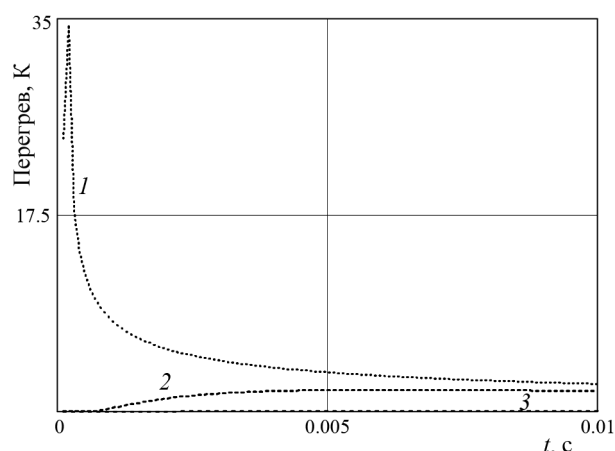


Рис. 2. Динамика изменения температуры в различных точках силовой основы для установки NIF: плита основы $440 \times 440 \times 100 \text{ мм}$ из алюминия (1 – на поверхности, 2 – 1 мм , 3 – 5 мм)

действовать на поверхность зеркала. На макете деформируемого зеркала были проведены специальные эксперименты по регистрации изменения СКО от базового варианта при последовательном отключении приводов [3] как для случая без подключения обратной связи, так и при включенной обратной связи. В случае выключенной обратной связи установлено, что $\text{СКО}_n = 0.5(n - 1) \text{ мкм}$, где n – количество приводов (зависимость верна для $n \geq 2$).

Было установлено, что применительно к установке «Луч» (для которой ограничение $\text{СКО} \leq 0.2 \text{ мкм}$) выход из строя даже одного привода недопустим. В случае включенной обратной связи удастся удержать стабильность оптической поверхности вплоть до выхода из строя четырех актюаторов. При этом

нарастание СКО описывается зависимостью $\Delta \text{СКО}_n = 0.0104n$, мкм.

2.3.2. Нагрев и термическое расширение приводов

В процессе работы пьезопривода в составе деформируемого зеркала происходит диссипация части подводимой к нему энергии, которая нагревает привод, приводит к его расширению и может неблагоприятным образом искажать оптическую поверхность зеркала. В случае подачи на привод гармонической электрической нагрузки $u = u_0 \sin(\omega t)$ средняя диссипируемая приводом мощность (активная составляющая мощности, переходящей в тепловую мощность) оценивается по формуле

$$P = 0.5\pi C f u_0^2 \text{tg}\delta, \quad (16)$$

где u , u_0 – напряжение, В; f – частота, Гц; C – емкость пьезопривода, Ф; $\text{tg}\delta$ – тангенс угла (коэффициент) диэлектрических потерь, который определяется качеством изготовления материала и определяет величину выделяемой в актюаторе тепловой мощности при частотном режиме его работы. Коэффициент диэлектрических потерь зависит от материала и от подаваемого на привод напряжения, и в условиях слабых сигналов обычно составляет величину 0.01–0.02, а для сильных сигналов $\text{tg}\delta$ возрастает до 0.1–0.12.

Дальнейшие рассуждения приведены для одного блока пьезопривода, набранного из пьезокерамики ЦТС-46 (табл. 2) [11, 12]. Эти блоки используют при изготовлении пьезоэлектрических актюаторов типа АПМ-2, применяемых в широкоапертурных зеркалах импульсных мощных лазерных установок.

Оценки по (16) показывают, что для одного блока пьезокерамики при $u_0 = 100$ В (практически верхний предел напряжения в действующих деформируемых зеркалах с актюаторами типа АПМ-2-х, где $x = 7; 11; 15; 22$) изменение частоты f от 1 до 1000 Гц приводит к увеличению тепловыделения с $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ до 0.3 Вт. При этом не достигается ограничение на максимальное тепловыделение (0.5 Вт), наложенное в [11]. По экспериментальным данным [11] превышение температуры блока пьезокерамики над окружающей средой при тепловыделении 0.5 Вт выйдет на уровень 30 °С в течение 2.5 с. Превышение уровня перегрева выше 30 °С может привести к проблемам с эпоксидными клеями,

Таблица 2. Характерные размеры и параметры одного блока из пьезокерамики ЦТС-46 [11]

Параметр	Значение параметра
Размеры	6×6×2.7 мм ³
Количество поляризованных слоев	50
Количество неполяризованных слоев	4
Толщина одного слоя	50 мкм
Толщина электродных пластин	4 мкм
Максимальный ход блока	2.5 мкм
Статическая емкость блока	0.5 мкФ
Рассеиваемая входная мощность на актюаторе	не более 0.5 Вт (при этом температура перегрева будет ~ 30 °С)
Максимальная температура блока	не более 80 °С
ТКЛР керамики	$3 \cdot 10^{-6}$ 1/К
Коэффициент теплопроводности в радиальном направлении $\lambda_{ }$ [13]	$\lambda_{ } = a_{ } \rho c_p = 5.4$ Вт/(м·К)
Коэффициент теплопроводности в аксиальном направлении λ_{\perp} [13]	$\lambda_{\perp} = (1.1 \pm 0.1)$ Вт/(м·К)

которыми соединяют блоки пьезокерамики в актюаторы с заданными параметрами. При охлаждении блока естественной конвекцией (коэффициент теплоотдачи с поверхности $\alpha \sim 10$ Вт/(м²·К)) распределение температуры по толщине блока остается практически равномерным, так как критерий Био $Bi = \alpha R / \lambda \ll 0.1$ (где $R = 3$ мм – характерный размер блока, λ – коэффициент теплопроводности материала блока). Для λ в [13] получены следующие оценки: коэффициент теплопроводности в радиальном направлении $\lambda_{||} = a_{||} \rho c_p = 5.4$ Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности в аксиальном направлении $\lambda_{\perp} = (1.1 \pm 0.1)$ Вт/(м·К). С учетом этих величин критерий Био оценивается как $Bi = (0.0056 - 0.03) \ll 0.1$.

Обычно деформируемое зеркало в процессе работы корректирует два основных вида аберраций – низкочастотные (частоты от 1 до 10 Гц, требуемые напряжения 100–10 В) и высокочастотные (частоты от 100 до 400 Гц, требуемые напряжения 10–1 В). При этом тепловыделение на приводах, исправляющих низкочастотные искажения, с большим ходом приводов, оценивается в $(0.3 - 3) \cdot 10^{-4}$ Вт; а при исправлении высокочастотных искажений, с

Таблица 3. Перемещение актюаторов при нагреве на 30°C ($\beta = 3 \cdot 10^{-6}$ 1/К)

Тип актюатора	Высота, мм	Перемещение, мкм
АПМ-2-7	20	1.8
АПМ-2-11	30	2.7
АПМ-2-15	40	3.6
АПМ-2-22	60	5.4

малым ходом приводов – в $(0.01-3) \cdot 10^{-4}$ Вт. В табл. 3 приведены оценки терморасширений приводов типа АПМ-2-х при максимально допустимом тепловыделении в 0.5 Вт (температура привода возрастает на 30 °С).

Видно, что для этого гипотетического случая разогрев актюаторов может стать серьезным сдерживающим фактором ввиду возможного сильного изменения формы оптической поверхности зеркала. Оптимизм внушает то обстоятельство, что в реальных условиях тепловыделение в приводах должно быть на несколько порядков меньше.

3. Параметры стабильности материала

Параметры стабильности материалов оптики могут быть классифицированы как оценка стойкости материалов сопротивляться воздействию температуры, пластическому деформированию и термоупругому изменению формы [4, 5]. Наилучшими материалами будут те, которые при прочих равных условиях выдерживают наибольшие тепловые потоки по указанным признакам.

Таблица 4. Критические тепловые потоки при непрерывном нагружении и критерии выбора материала оптического элемента (R – радиус пятна нагружения)

Параметр	По температуре	По напряжению	По перемещению (в пределах пятна нагрева)
Критический тепловой поток $q_{кр}$	$\frac{\lambda T_{кр}}{R}$	$\frac{2\lambda\sigma_{кр}}{\beta ER}$	$\frac{4\lambda W_{кр}}{\beta R^2(1+\nu)}$
Критерий выбора материала	$\max\{\lambda T_{кр}\}$	$\max\left\{\frac{\lambda\sigma_{кр}}{\beta E}\right\}$	$\max\left\{\frac{\lambda}{\beta(1+\nu)}\right\}$

Таблица 5. Критические тепловые потоки при импульсном нагружении и критерии выбора материала оптического элемента [5]

Параметр	По температуре	По напряжению	По перемещению (в пределах пятна нагрева)
Критический тепловой поток $q_{кр}$	$\sqrt{\pi} \frac{\lambda T_{кр}}{2\sqrt{at_0}}$	$\sqrt{\pi} \frac{\lambda(1-\nu)\sigma_{кр}}{2\beta E\sqrt{at_0}}$	$\frac{\lambda W_{кр}}{2\beta a(1+\nu)t_0}$
Критерий выбора материала	$\max\left\{(\lambda\rho c_p)^{1/2} T_{кр}\right\}$	$\max\left\{\frac{(\lambda\rho c_p)^{1/2}(1-\nu)\sigma_{кр}}{\beta E}\right\}$	$\max\left\{\frac{c_p\rho}{\beta(1+\nu)}\right\}$

В модельном приближении о непрерывном локальном нагреве полупространства используем предположение о достижении неких критических значений (температуры, напряжения, перемещения). Определим критические тепловые потоки и критерии выбора материала (табл. 4 [5]).

Аналогично можно получить параметры стабильности для импульсного режима лазерного нагружения [5]. В приближении полупространства максимальная температура на оптической поверхности $T_n(Fo)$ достигается в центре зоны нагрева и для безразмерного времени $(1/2\sqrt{Fo}) \gg 1$ оценивается по формуле

$$T_n(Fo) \approx \frac{qR}{\lambda} \frac{2\sqrt{Fo}}{\sqrt{\pi}}, \quad (17)$$

на основе которой может быть найден критический тепловой поток и сформировано условие выбора материала для оптических элементов по тепловому признаку. Условия выбора материалов при воздействии на поверхность оптического элемента локального теплового импульса продолжительностью t_0 по достижению критической температуры, пластической деформации и термоупругому формоизменению поверхности представлены в табл. 5.

На основе свойств неметаллических и некоторых металлических материалов (табл. 6) в табл. 7 приведены результаты оценок параметров стабильности для различных материалов, применяемых при создании неохлаждаемых оптических элементов. В качестве критической

Таблица 6. Свойства материалов, используемых для создания неохлаждаемых оптических элементов

Материал	λ , Вт/(м·К)	$\beta \cdot 10^6$, 1/К	c_p , Дж/(кг·К)	$E \cdot 10^{-10}$, Па	$\sigma \cdot 10^{-7}$, Па	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	ν	$a = \lambda/(\rho c_p) \cdot 10^5$, м ² /с	$T_{кр}$, К
Ситалл СО-115М	1.98	0.15	920	9.2	16.6	2.46	0.28	0.087	820 термостойкость
Лейкосапфир Al ₂ O ₃	27.21	5.6	419	33.5	27.5	3.97	0.25	1.64	2313 плавление
Кварцевое стекло (КВ)	1.38	0.55	703	7.36	5.5	2.21	0.17	0.089	1348 температура деформации
Стекло К-8	1.114	7.7	858	8.2	5.9	2.51	0.206	0.052	830 фазовое превращение
Кремний	140	2.55	680	10.9	13	2.33	0.25	8.6	1956 плавление
Карбид кремния	150	2.8	700	37.0	32	3.00	0.18	6.8	1683 плавление
Алюминий	211	24.5	930	6.85	6.44	2.74	0.345	8.3	933 плавление
Медь дефор.	400	17.4	385	11.2	6.85	8.93	0.343	11.6	1356 плавление
Молибден	130	5.2	251	33	29.4	10.22	0.31	5.1	2610 плавление
Инвар, 36Н	11	1.2	440	14.7	21	8.07	0.25	0.31	1698 плавление
Суперинвар, 32НК-ВИ	12.5	0.7	440	14.4	18	8.2	0.25	0.35	1723 плавление

Примечание. Данные взяты из различных литературных источников.

Таблица 7. Оценка параметров стабильности оптических материалов

Материал	Непрерывное излучение			Импульсное излучение		
	Температура	Напряжение	Перемещение	Температура	Напряжение	Перемещение
	$\lambda T_{кр} \cdot 10^{-4}$	$\frac{\lambda \sigma_{кр}}{\beta E} \cdot 10^{-4}$	$\frac{\lambda}{\beta(1+\nu)} \cdot 10^{-6}$	$(\lambda \rho c_p)^{1/2} T_{кр} \cdot 10^{-6}$	$\frac{(\lambda \rho c_p)^{1/2} (1-\nu) \sigma_{кр}}{\beta E} \cdot 10^{-6}$	$\frac{c_p \rho}{\beta(1+\nu)} \cdot 10^{-12}$
Ситалл СО-115М	0.162	2.38	10.3	1.74	18.3	11.80
Лейкосапфир Al ₂ O ₃	6.294	4.00	3.89	4.43	0.74	0.24
Кварцевое стекло (КВ)	0.186	0.19	2.14	1.97	1.65	2.41
Стекло К-8	0.095	0.01	0.12	1.29	0.115	0.23
Кремний	27.38	6.55	43.9	29.56	5.22	0.50
Карбид кремния	25.25	4.90	41.85	30.70	4.3	0.62
Алюминий	19.68	0.81	6.4	21.63	0.58	0.077
Медь дефор.	54.24	1.40	17.1	50.29	0.86	0.15
Молибден	33.93	2.23	19.1	47.66	2.16	0.38
Инвар, 36Н	1.870	1.31	7.33	10.61	5.58	2.37
Суперинвар, 32НК-ВИ	2.154	2.23	14.3	11.57	9.0	4.12

температуры выбрана температура из табл. 6, в качестве критического напряжения выбран предел прочности σ_n из табл. 6.

Анализ результатов в табл. 7 (лучшие результаты для неметаллических и металлических материалов выделены жирным шрифтом) показал, что при воздействии на неохлаждаемые оптические элементы непрерывного лазерного излучения среди неметаллических материалов по всем трем параметрам стабильности (температуре, напряжению, перемещению) на первом

месте стоят кремний и карбид кремния. Среди металлических – медь (температура), молибден – (напряжение, перемещение). При воздействии импульсного излучения: карбид кремния и медь (температура), ситалл СО-115М и суперинвар – (напряжение и перемещение).

Заключение

Проведенный анализ позволил предъявить требования к максимально допустимым размерам дефектов на оптической поверхности и покрытии.

Геометрическая стабильность формы оптической поверхности при изменении температуры окружающей среды, световом воздействии и во времени обеспечивается материальным составом и конструкцией деформируемого зеркала. Для разработанных конструкций деформируемых зеркал импульсных мощных лазерных установок экспериментально показана температурная, тепловая и временная стабильность удержания формы оптической поверхности.

Стабильность оптической поверхности зеркала зависит от материала и условий лазерного нагружения. Среди неметаллических материалов, применяемых в импульсных мощных лазерных установках, при непрерывном лазерном излучении наиболее стабилен карбид кремния и кремний, при воздействии импульсного излучения – карбид кремния и ситалл.

Данную работу авторы посвящают коллеге, другу и брату доктору технических наук, профессору Шанину Олегу Ивановичу, рано покинувшему нас и не успевшему опубликовать приведенные материалы, авторство большей части которых несомненно принадлежит ему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zacharias R.A., Beer N.R., Bliss E.S. et al. Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility // Opt. Eng. 2004. V. 43. N 12. P. 2873–2884.
- Шанин О.И. Широкоапертурная адаптивная силовая оптика // Фотоника. 2012. Т. 31. №1. С. 24–30.
- Шанин О.И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012. 200 с.
- Аполлонов В.В., Барчуков А.И., Карлов Н.В. Параметры стабильности зеркальных поверхностей лазерных отражателей // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. Вып. 11. С. 522–525.
- Власов Н.М., Колесов В.С., Федик И.И. Стабильность оптической поверхности лазерных зеркал. М.: ЦНИИ-АТОМИНФОРМ, 2005. 216 с.
- Ляхов Д.М., Шанин О.И., Щипалкин В.И. Модифицированный метод Гартмана для измерения характеристик широкоапертурных адаптивных зеркал // Автометрия. 2012. Т. 48. № 2. С. 86–91.
- Бабаянц К.Г., Жупанов В.Г., Клюев Е.В. и др. Диэлектрические покрытия с высокой лучевой стойкостью для различных диапазонов длин волн // X Харитоновские чтения «Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергий». Саров. 2008. С. 69–70.
- Kozlowski M.R., Staggs M.C., Rainer F., Stathis J.H. Laser conditioning and electronic defects of HfO₂ and SiO₂ thin films // Proc. SPIE. Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1990, 1991. V. 1441. P. 269–282. DOI: 10.1117/12.57234
- Шанин Ю.И., Шанин О.И., Черных А.В., Шарапов И.С. Влияние несовершенств излучения и технологии на термдеформированное состояние оптических элементов // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 3. С. 714–720.
- Chester M. Second sound in solids // Physical Review. 1963. V. 131. Iss. 5. P. 2013–2015.
- Сафронов А., Климашин В., Парфенов Б., Ярошевич В., Никифоров В. Пьезокерамические пакетные и моноблочные актюаторы // Компоненты и технологии. 2002. № 6. С. 26–28.
- Никифоров В.Г. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы: Теория и практика. М.: ОАО «НИИ «Элла», 2010. 68 с.
- Шанин Ю.И., Шанин О.И., Черных А.В., Шарапов И.С. Тепловое состояние пьезоприводов в лазерных деформируемых зеркалах // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 10. С. 471–480.

Technological defects and operational conditions impact on the deformable mirrors operability

A.V. Chernykh¹, Yu.I. Shanin²

¹ Institute of Laser Physics Research «Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics» (ILFI FSUE RFNC-VNIIEF), Sarov, 607188, Russia

² Scientific Research Institute Scientific Industrial Association «LUCH» (FSUE SRI SIA LUCH), Podolsk, 142103, Russia
e-mail: syi@luch.com.ru

The main optical element of the adaptive optical system is a deformable mirror, by which the aberrated wave front of laser radiation is corrected. Today, it is still possible to do with uncooled optical elements, both while creating pulsed high-power laser systems for inertial fusion, and continuous technological laser systems. This is allowed by the technology of applying multi-layer quarter-wave reflecting coatings on the optical surface, which ensures higher coefficient of specular reflection of the mirror reflecting surface, providing all at once their radiation resistance. Creating uncooled, deformable mirrors for pulsed and continuous laser systems is costly and time consuming. It is necessary to set reasonable requirements for the quality of the mirror optical surface processing for costs reduction. To this end, we have evaluated the critical sizes of possible defects of optical surface and coating on the mirror substrate at the manufacturing stage from the viewpoint of achieving limitations on temperature, strain, or displacement under laser loading conditions. The prepared optical surface may have trifle defects (stains, scratches), or there may be defects of the coating. It is important to know critical size of such defects, which exceeding may lead

various damages of the mirror while operation up to the mirror failure. Ensuring the optical surface stability while mirror operation is the main task of both manufacturing process and during further operation of the mirror. The paper considers the effect of factors violating optical stability:

- 1) Temperature stability while the ambient temperature changes;
- 2) Thermal stability when optical surface is exposed to laser radiation, or heating of the mirror base due to the pulsed exposure to radiation from pumping lamps;
- 3) Due to the failure and warming up of the drives.

As the geometric stability of the mirror optical surface is a direct consequence of the thermal, physical and mechanical properties of the material of the mirror, the choice of the best materials for the mirrors is considered from the viewpoint of ensuring maximum stability parameters values. Silicon and silicon carbide are in the first place among non-metallic materials in all three parameters of stability (temperature, stress, displacement) when it comes to exposing uncooled optical elements to continuous laser radiation; copper (temperature) and molybdenum (stress, displacement) are the best among metals. Silicon carbide and copper (temperature), glassceramic CO-115M and superinvar (stress and displacement) are the best while exposing to pulsed radiation.

Keywords: laser mirror, deformable mirror, optical element, powerful pulse laser system, laser system, temperature, heat flow.

REFERENCES

1. **Zacharias R.A., Beer N.R., Bliss E.S.** et al. Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility. *Optical Engineering*, 2004, vol. 43, no. 12, pp. 2873–2884. <https://doi.org/10.1117/1.1815331>
2. **Shanin O.I.** Широкоапертурная адаптивная силовая оптика [Large aperture adaptive power optics]. *Fotonika – Photonics*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 24–30. In Russ.
3. **Shanin O.I.** Адаптивные оптические системы в импульсных лазерных установках [Adaptive optical systems in pulsed high-power laser systems]. Moscow, Technosphere, 2012. 200 p. In Russ.
4. **Apollonov V.V., Barchukov A.I., Karlov N.V.** Параметры стабильности зеркальных поверхностей лазерных отражателей [Stability parameters of mirror surfaces of laser reflectors]. *Pis'ma v ZHTF – Technical Physics Letters*, 1975, vol. 1, no. 11, pp. 522–525. In Russ.
5. **Vlasov N.M., Kolesov V.S., Fedik I.I.** Стабильность оптической поверхности лазерных зеркал [The stability of the optical surface of the laser mirrors]. Moscow, TSNIATOM-INFORM, 2005, 216 p. In Russ.
6. **Lyakhov D.M., Shanin O.I., Shchipalkin V.I.** Modified hartmann method for measuring wide-aperture adaptive mirrors. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 182–187.
7. **Babayants K.G., Zhupanov V.G., Klyuev E.V.**, et al. Диэлектрические покрытия с высокой лучевой стойкостью для различных диапазонов длин волн [Dielectric coatings with high radiation resistance for various wavelength ranges]. *V sbor. tezisov dokladov X Kharitonovskikh chteniy «Moshchnyye lazery i issledovaniya fiziki vysokikh plotnostey energii» – In the collection of abstracts X Kharitonov's readings «Powerful lasers and high-energy density physics research.»* Sarov, 2008, pp. 69–70. In Russ.
8. **Kozlowski M.R., Staggs M.C., Rainer F., Stathis J.H.** Laser conditioning and electronic defects of HfO₂ and SiO₂ thin films. *Proc. SPIE. Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1990, 1991*, vol. 1441, pp. 269–282. DOI: 10.1117/12.57234
9. **Shanin Yu.I., Shanin O.I., Chernykh A.V., Sharapov I.S.** Influence of imperfections of radiation and technology on the thermally deformed state of optical elements. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 679–684.
10. **Chester M.** Second sound in solids. *Physical Review*, 1963, vol. 131, no. 5, pp. 2013–2015.
11. **Safronov A., Klimashin V., Parfenov B., Yaroshevich V., Nikiforov V.** Пьезокерамические пакетные и моноблочные актуаторы [Piezoceramic batch and one-piece actuators]. *Komponenty i tekhnologii – Components and technologies*, 2002, no. 6, pp. 26–28. In Russ.
12. **Nikiforov V.G.** Многослойные пьезоэлектрические актуаторы: Теория и практика [Multilayer piezoelectric actuators: Theory and practice]. Moscow, JSC «Research Institute «Elpa», 2010. 68 p. In Russ.
13. **Shanin Yu.I., Shanin O.I., Chernykh A.V., Sharapov I.S.** Тепловое состояние пьезоприводов в лазерных деформируемых зеркалах [Thermal state of piezoelectric actuators in laser deformable mirrors]. *Тепловые процессы в технике – Thermal processes in engineering*, 2015, no. 10, pp. 471–480. In Russ.

Учредитель и издатель журнала:

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-72651 от 16.04.2018

Редактор Бублик Н.П., e-mail: tpt@mai.ru

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в МАИ.

Сдано в набор 28.07.2019. Подписано в печать 8.08.2019.

Формат 60×90 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5.82. Уч.-изд. л. 6.35. Тираж 55 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «Печатный салон ШАНС»