

Таким образом, принимая во внимание результаты моделирования, можно предположить, что пленки меди в рассмотренных экспериментах конденсировались по островковому механизму.

Список литературы

1. Иевлев В.М., Бугаков А.В., Трофимов В.И. “Рост и субструктура конденсированных пленок”. Воронеж, Изд-во ВГТУ, 2000, 386 с.
2. И.С. Смирнов, А.М. Баранов, П.Е. Кондрашев, Е.Г. Новоселова, И.С. Монахов “Метод *in-situ* рентгеновской рефлектометрии для контроля параметров поверхностных слоев”// Труды X Межнародного совещания “Радиационная физика твердого тела”, М.: НИИ ПМТ, 2000 г., с. 406-410.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ ОПТИЧЕСКИХ УЗЛОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Виноградов А.Н., Духовенский Г.Е., Матвеев Е.В.

ГУВПО МИЭМ (109028, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3),
ГНУ НИИ ПМТ (115054 г. Москва, ул. М. Пионерская, 12;
E-mail: niipmt@mail.ru)

Рассматривается методика и приведены результаты расчета термоупругого напряженно-деформированного состояния (НДС) в слоях многослойных покрытий нанометровой толщины на оптических деталях. Для сравнения результатов проведены исследования НДС методом конечных элементов в системе АРМ WinMachine [5]. Показан способ снижения температурного прогиба с помощью слоя из пьезокерамического наноматериала.

Просветляющие тонкие плёнки уменьшают потери на светорассеяние и увеличивают коэффициент отражения в зеркалах, например, в кольцевых лазерных гироскопах (ЛГ) космических летательных аппаратов и ракет. При тепловом воздействии (нагрев или охлаждение от естественного состояния) происходят деформации подложки зеркала, влияющие на интерференционные свойства оптических резонаторов ЛГ [2].

Расчетная схема модели круглого плоского зеркала с чередующимися тонкими просветляющими слоями приведена на рис. 1.

Диск-подложка 1 выполнен из оптического ситалла. На его верхней поверхности нанесены несколько пар тонких слоев 2 и 3 из оксидов кремния SiO_2 и титана TiO_2 , а на нижней – тонкое пьезокерамическое кольцо 4 – компенсирующий слой. Система свободно опирается на плоскость (XY).

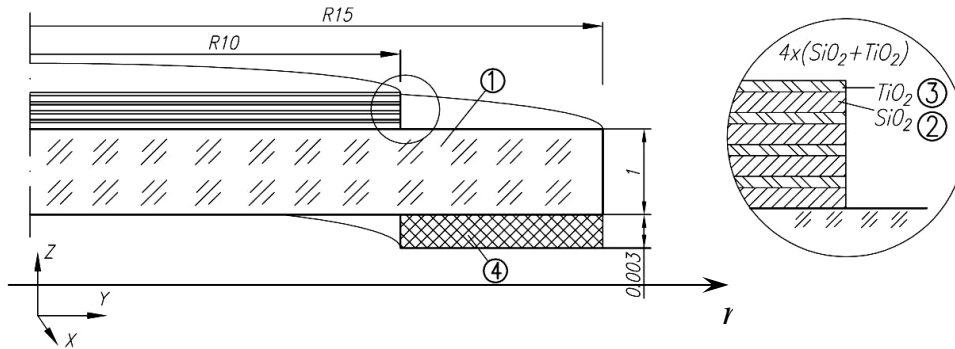


Рис. 1. Схема поперечного сечения многослойной модели

Аналитическая модель построена на основных зависимостях теории изгиба круглых пластин [1] с учетом теплового и пьезоэлектрического воздействия [2]. Закон Гука в цилиндрических координатах (r, θ, z) при изменении температуры на ΔT в этом случае дает зависимость между радиальными σ_r и окружными σ_θ напряжениями и соответствующими деформациями ε_r и ε_θ в произвольной точке каждого слоя в виде:

$$\varepsilon_r = du/dr = (\sigma_r - \nu \sigma_\theta)/E + \alpha \Delta T + \beta U; \quad \varepsilon_\theta = u/r = (\sigma_\theta - \nu \sigma_r)/E + \alpha \Delta T + \beta U.$$

Здесь обозначены: модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν , температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) α , пьезоэлектрический коэффициент линейного расширения (ПКЛР) $\beta = d_{31}/h$, где d_{31} – поперечный пьезомодуль компенсирующего слоя толщиной h ; U – разность потенциалов на его плоскостях; u – перемещение по r .

Модель представляется составленной из m многослойных кольцевых элементов с внешним диаметром D_i ($i = 1 \dots m$). В каждом i -м кольце число различных слоев постоянно. НДС кольцевого элемента описывается уравнениями теории упругости [1] для осесимметричной задачи. В расчётной модели ось r совмещена с нижним слоем. В силу осевой симметрии напряжения и деформации не зависят от окружной координаты θ . Уравнение равновесия приводится к виду однородного дифференциального уравнения относительно функции радиального перемещения $u_i(r, z)$:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (u_i r) \right] = 0,$$

решение которого с учетом гипотезы Кирхгофа-Лява ($\partial^2 u / \partial z^2 = 0$) о прямолинейности нормали при изгибе представляется зависимостью:

$$u_i(r, z) = C_{1i} r - C_{2i} r z + C_{3i}/r - C_{4i} z/r,$$

где $C_{1i} - C_{4i}$ произвольные постоянные определяются из граничных условий и условий сопряжения кольцевых элементов по перемещениям, продольным силам и изгибающим моментам.

Радиальные ε_r и окружные ε_θ деформации в точке (r, z) произвольного слоя, а также прогиб системы w определяются следующими выражениями:

$$\epsilon_{ri}(r,z) = C_{1i} - C_{2i}z - C_{3i}/r^2 + C_{4i}z/r^2; \quad \epsilon_{\theta i}(r,z) = C_{1i} - C_{2i}z + C_{3i}/r^2 - C_{4i}z/r^2;$$

$$w_i(r) = 0,5C_{2i}r^2 + C_{4i}\ln r + C_{5i},$$

где постоянные C_{5i} находятся из условия непрерывности функции $w(r)$ и условий закрепления. В случае опоры на внешнем контуре $w_m(D_m/2) = 0$.

Исследуемая модель содержит подложку диаметром 30 мм с нанесенными $2n$ слоями SiO_2 и TiO_2 с толщинами h_2 и h_3 соответственно (рис. 1).

Свойства слоев, принятые с использованием [3], приведены в таблице 1.

Свойства многослойной модели

Таблица 1

№	Материал	h , мкм	E , ГПа	ν	α , $1/^\circ\text{C}$	d_{31} , мм/В	β , 1/В
1	CO-115	1000	76,0	0,28	$1,0 \cdot 10^{-7}$	—	—
2	SiO_2	0,50	110,0	0,17	$5,0 \cdot 10^{-7}$	—	—
3	TiO_2	0,25	284,0	0,25	$8,2 \cdot 10^{-6}$	—	—
4	ЦТС	3,0	73,4	0,30	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$

На рис. 2, а) приведены графики деформации подложки с 8-ю чередующимися просветляющими слоями при нагревании на $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. Диаметр d площадки этих слоев принят от 5 до 30 мм. Наибольший прогиб в центральной части составляет величину от 20 нм (при $d = 5$ мм) до 200 нм ($d = 30$ мм). На рис. 2, б) показаны такие же зависимости для модели с двумя утолщенными в 4 раза слоями, полученные аналитически и по МКЭ.

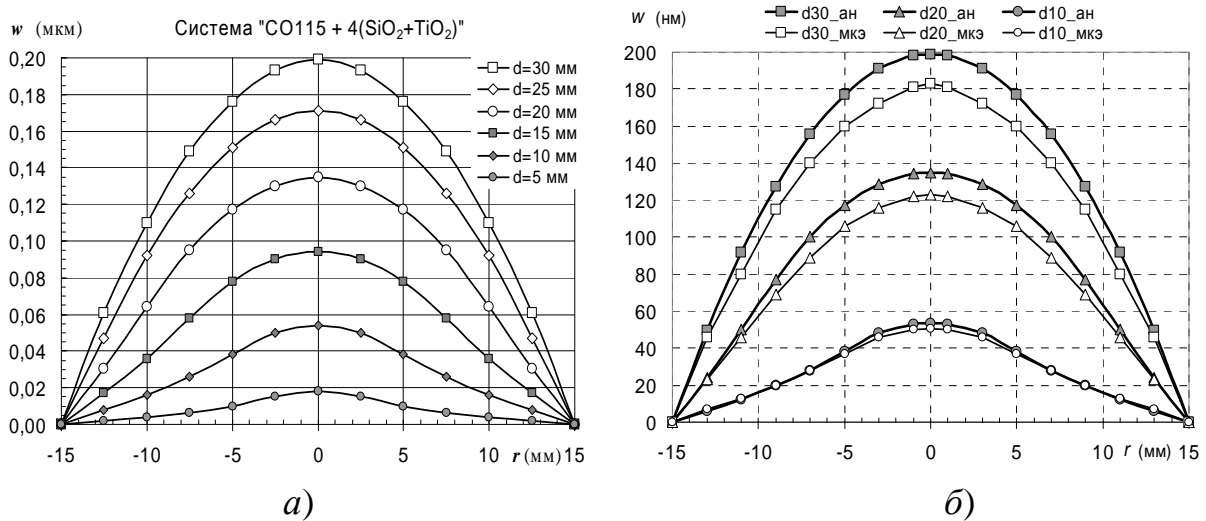


Рис. 2. Деформации подложки при нагревании на 10°C с покрытиями:

а) 4 пары тонких слоев с $h_2=500$ нм, $h_3=250$ нм; б) 1 пара слоев с $h_2=2$ мкм, $h_3=1$ мкм

Как видно, прогибы оказываются соизмеримыми с величиной $\lambda/4$ при длине волны лазера $\lambda = 628$ нм. При других температурах прогибы изменяются пропорционально ΔT , например, при охлаждении от $+20$ до -60°C ($\Delta T = -80^\circ$) прогиб в центре всей модели составит от -160 нм до $-1,6$ мкм для площади покрытия диаметром от 5 до 30 мм соответственно.

На рис. 3 показаны графические зависимости радиуса кривизны ρ от температуры нагрева при диаметрах площадки слоев d от 5 до 30 мм.

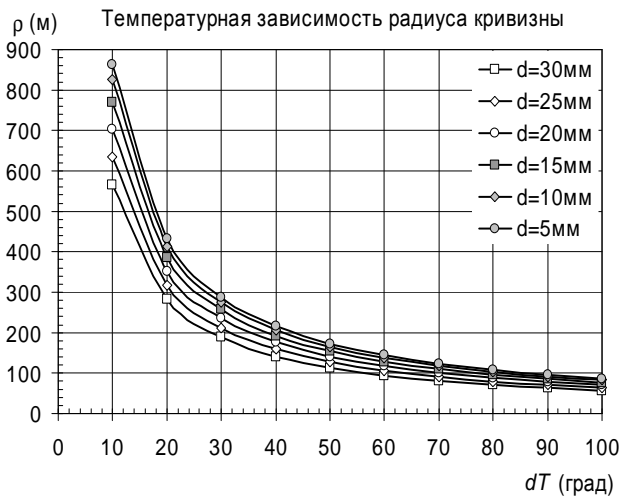


Рис. 3. Изменение радиуса кривизны ρ при нагревании

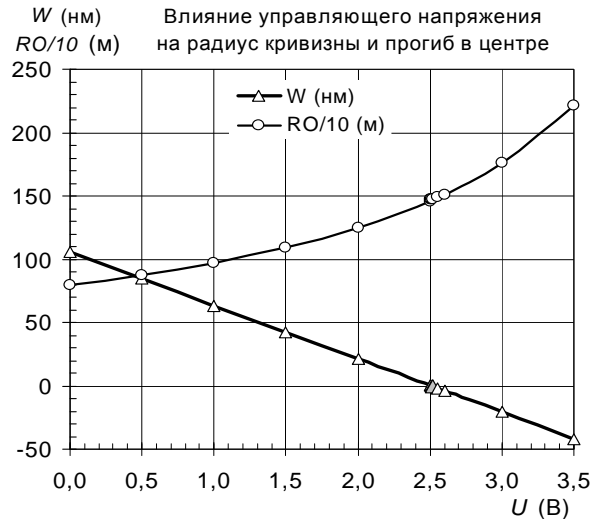


Рис. 4. Зависимость радиуса кривизны и прогиба от напряжения на пьезокерамике

Увеличить радиус кривизны в зоне отражающего покрытия ($d = 20$ мм) с 700 до 1500 м и снизить прогиб W_0 в центре до нуля позволяет наличие пьезокерамического кольца шириной $dR_{ПК} = 5$ мм (см. рис. 1). Графические зависимости величин $RO/10 \equiv 0,1\rho$ и W от напряжения приведены на рис. 4.

На рис. 5 показаны формы прогиба для половины модели при различных напряжениях на пьезокерамике: $U = 0; 1; 2; 2,505$ В. В «Исходной» модели пьезокерамический слой отсутствует. График $U=0$ показывает снижение прогиба без напряжения на компенсирующем кольце. Напряжение $U=2,505$ В полностью снимает тепловой прогиб. При этом деформируется периферийный участок с наибольшим прогибом около -50 нм.

На рис. 6 приведены результаты моделирования методом конечных элементов (МКЭ), где показаны карты вертикальных перемещений W и формы поперечного сечения модели при тепловом и пьезоэлектрическом воздействиях. Пьезоэлектрические деформации компенсирующего слоя при расчетах по МКЭ учтены путем температурной аналогии [4].

Моделирование с различным количеством регулярно расположенных слоев из SiO_2 и TiO_2 показало, что тепловое НДС конструкции не зависит от числа слоев при условии сохранения их суммарных толщин. Так, приведенные на рисунках 2–6 результаты справедливы как для пары слоев с толщинами $h_2 = 2$ мкм, $h_3 = 1$ мкм, так и для толщин $h_2 = 2/n$ мкм, $h_3 = 1/n$ мкм, где n – число каждого слоя в системе. Например, для общего числа слоев $2n = 16$ толщина слоя SiO_2 составляет 250 нм, а слоя TiO_2 – 125 нм.

Распределения напряжений по слоям, полученные аналитически и по МКЭ, при нагревании всей системы на 100 градусов приведены в таблице 2. Как показали расчеты, радиальные напряжения σ_r в тонких слоях практически совпадают с окружными σ_θ и не зависят от диаметра покрытия d .

Подложка испытывает изгиб с напряжениями сжатия снизу и растяжения – в верхних слоях. Величины напряжений далеки от предельных, кро-

ме слоя TiO_2 . В последнем напряжения близки к пределу прочности на растяжение (300 МПа), поэтому для него опасным является охлаждение.

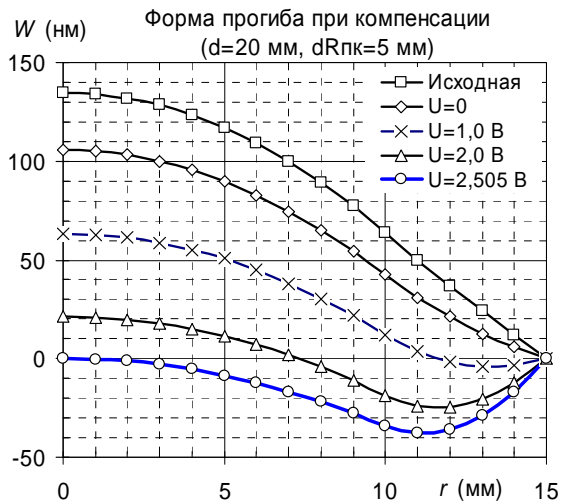


Рис. 5. Влияние компенсирующего напряжения на форму прогиба

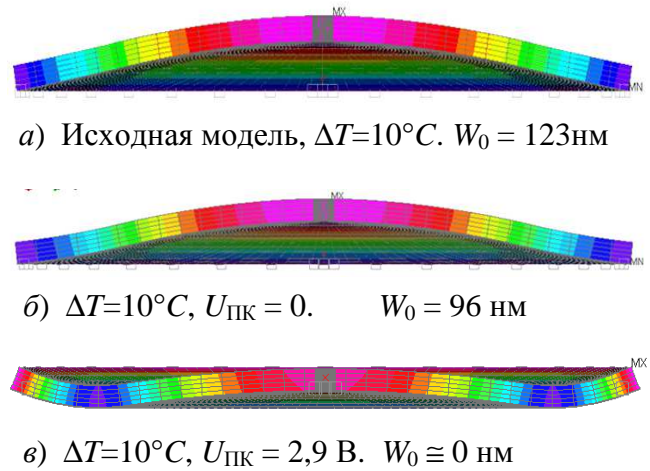


Рис. 6. Деформации модели (карты W), полученные по МКЭ

Таблица 2

Температурные напряжения в $(2n+1)$ -слойной модели при $\Delta T = 100^\circ\text{C}$

№ слоя	Материал	Толщина	Ордината ($i = 1, \dots, n$)	$\sigma_r = \sigma_\theta$ (МПа) аналитически	$\sigma_r = \sigma_\theta$ (МПа) по МКЭ
1	CO-115	$h_1=1,0$ мм	$z_0 = 0$ (низ)	-0,50	-0,55
	CO-115	$h_1=1,0$ мм	$z_1 = h_1$ (верх)	+1,00	+1,045
2	SiO_2	$h_2=2/n$ мкм	$z_{2i-1} \leq z \leq z_{2i-1}+h_2$	-4,08	-4,0...-3,5
3	TiO_2	$h_3=1/n$ мкм	$z_{2i} \leq z \leq z_{2i}+h_3$	-302,7	-304...-285

Величины касательных напряжений сравнительно малы во всех точках конструкции, за исключением краевых зон пьезокерамического кольца. На рис. 7 показана карта касательных напряжений в сечении четырехслойной модели в режиме термокомпенсации. Максимальные $\tau_{r\theta} = 2,11$ МПа при $\Delta T=100^\circ\text{C}$ видны в локальных зонах, выделенных кружочками.

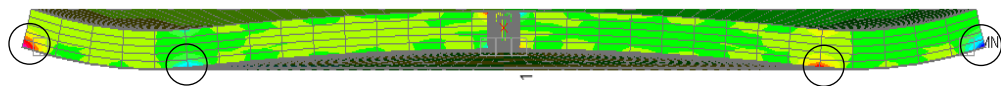
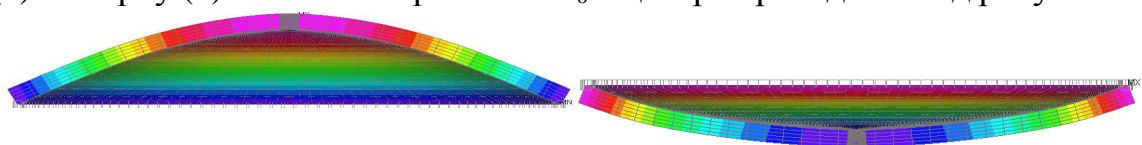


Рис. 7. Касательные напряжения $\tau_{r\theta}$ в модели с пьезокерамическим кольцом

Характер прогиба зависит от способа крепления конструкции. На рис. 8 показаны формы изгиба при креплении подложки по внешнему контуру снизу (а) и сверху (б). Значения прогибов W_0 в центре приведены под рисунками.



а) $W_0 = +2,54$ мкм; $\Delta T = 100^\circ\text{C}$

б) $W_0 = -1,32$ мкм; $\Delta T = 100^\circ\text{C}$

Рис. 8. Влияние на W способа крепления внешнего контура: а) снизу; б) сверху

Выводы

Расчеты тепловых деформаций и напряжений в многослойных наноструктурах по разработанной методике показали, что НДС в тонких слоях, нанесенных на сравнительно толстую подложку, не зависят от количества слоев при условии сохранения их суммарной толщины. Внутренние напряжения в них определяются, в основном, разностью ТКЛР слоя и подложки. Возникающие при изменении температуры прогибы системы со слоями из оксидов SiO₂ и TiO₂ соизмеримы с $\lambda/4$ излучения лазера. Показан способ снижения теплового прогиба и увеличения радиуса кривизны оптической зоны. Сравнительный анализ характеристик НДС, полученных аналитически и по МКЭ, показал их совпадение с небольшой погрешностью, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Список литературы

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. – 560 с.
2. Виноградов А.Н., Вотинов Ю.Ю., Матвеев Е.В. Термоупругие модели многослойного пьезопривода наноперемещений в лазерном гироскопе/ Труды 2 Всероссийской научной школы для молодежи "Концентрированные потоки энергии в индустрии наносистем, материалов и живых систем": сб. научн. тр./МИЭМ. Москва, 2009. – с. 109-119.
3. Акустические кристаллы. Справочник/ Блистанов А.А., Бондаренко В.С. и др.; под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1982. – 632 с.
4. Виноградов А.Н., Матвеев Е.В. Моделирование резонатора пьезогироскопа в системе АРМ WinMachine / САПР и Графика. – М.: Компьютер-Пресс, 2008, №4. – с. 93-97.
5. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде АРМStructure3D.– М.: Изд-во АПМ. 2006. – 288 с.