

СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗЕРКАЛ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИЗЛУЧЕНИЯ УФ ЛАЗЕРОВ

О. А. Логунов, Н. В. Морозов, С. И. Сагитов, В. В. Слепцов

Измерена лучевая прочность алюминиевых зеркал, полученных с помощью различных технологий изготовления, на длинах волн 193, 248, 308 и 353 нм соответственно УФ лазеров ArF, KrF, XeCl и третьей гармоники Nd-YAG. Снижение порога разрушения при уменьшении длины волны связано с возрастанием коэффициента поглощения зеркал.

Алюминиевые зеркала в отличие от диэлектрических обладают высоким отражением в широкой области спектра. Их использование в лазерах позволяло получать генерацию и в инфракрасном диапазоне, и в вакуумном ультрафиолете. Но до настоящего времени они имели относительно малую лучевую прочность в УФ области ($0,25 \text{ Дж/см}^2$ при длине волны $\lambda = 248 \text{ нм}$ /1/). Однако в связи с возникновением новых методов получения зеркал в этой области появляются обнадеживающие результаты. Так, алюминиевые зеркала, полученные методом алмазного точения и импульсного напыления, имеют лучевую прочность $\sim 1,5\text{--}2 \text{ Дж/см}^2$ на $\lambda = 248 \text{ нм}$ /2/.

В последнее время большой интерес вызывает метод термоионного осаждения алюминия, когда одновременно подвергают бомбардировке низкоэнергетическими ионами и подложку, и растущий слой Al. Благодаря ионной бомбардировке достигается резкое повышение адгезии, плотности, механической прочности, коррозионной стойкости слоев, улучшаются и стабилизируются оптические свойства пленок /3/.

В настоящей работе исследовалась лучевая прочность алюминиевых покрытий, полученных методом термоионного осаждения на подложки из плавленого кварца КУ-1. Зависимость коэффициента отражения данных зеркал от длины волны при толщине слоя Al $120 \pm 10 \text{ нм}$ приведена на рис. 1. Измерения проводились в диапазонах длин волн 193–353 нм и длительностей импульса $\tau = 8\text{--}120 \text{ нс}$. Результаты измерений лучевой прочности зеркал представлены в табл. 1.

При измерениях лазерное излучение после диафрагмы, которая вырезала однородную часть лазерного пучка, линзой фокусировалось на исследуемое зеркало; распределение интенсивности излучения в фокусе было близко к гауссовскому. В другом случае для получения прямоугольного распределения интенсивности на зеркало линзой переносилось уменьшенное изображение диафрагмы. Испытания проводились на воздухе при размере облучаемого пятна $\phi 1\text{--}3 \text{ мм}$ и в рабочих условиях резонаторной оптики на электронно-пучковых KrF и ArF лазерах со световой апертурой 5 см. Измеренные разными методами пороги разрушения различались не более чем на 20%. За порог повреждения принималось максимальное значение плотности энергии излучения за серию импульсов, не приводящее еще к повреждению поверхности. Подробно методика описана в /1/.

Как видно из табл. 1, лучевая прочность алюминиевых зеркал, полученных методом термоионного осаждения, значительно превышает прочность зеркал с термическим напылением ($0,25 \text{ Дж/см}^2$ на $\lambda = 248 \text{ нм}$). Возникает вопрос, в чем причина такого большого расхождения. В рассматриваемом диапазоне длительностей лазерных импульсов тепловые эффекты проявляются на глубинах гораздо больше скин-слоя. Можно считать, что тепло выделяется в тонком слое $\sim 5 \text{ нм}$ /5/ и диффундирует внутрь пластины. Распространение тепла в глубь зеркала может быть описано с помощью уравнения теплопроводности /6/:

$$\partial T / \partial t = k / \rho C_p \nabla^2 T + q, \quad (1)$$

где $\partial T / \partial t$ — скорость изменения температуры тела во времени; T — температура; t — время; k — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность; C_p — удельная теплоемкость; q — источник тепла.

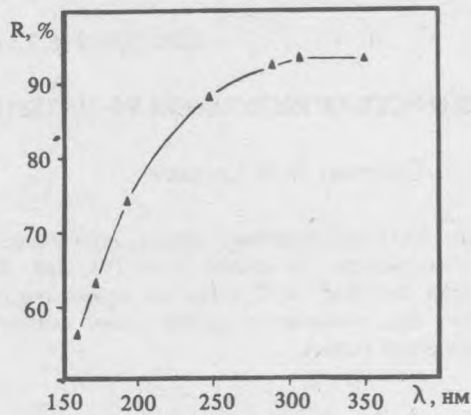


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента отражения R алюминиевого зеркала, полученного методом термоионного осаждения, в УФ диапазоне.

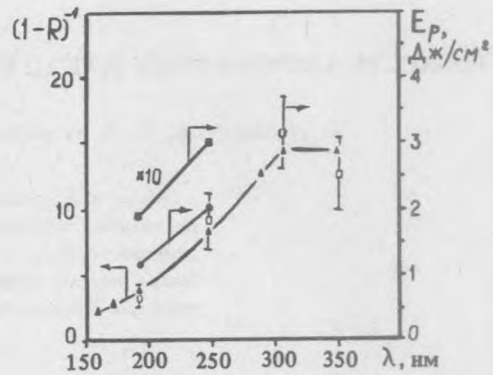


Рис. 2. Обратное поглощение $(1 - R)^{-1}$ зеркала с термоионным напылением (▲) и лучевая прочность E_{th} алюминиевых зеркал при длительности импульса 100 нс и разных методах напыления: термоионное (□), термическое (■), импульсное (●).

Если размер облучаемой области значительно превышает глубину проникновения тепла за время импульса, то уравнение теплопроводности (1) становится одномерным и будет иметь вид

$$\partial T / \partial t = (k / \rho C_p) \partial^2 T / \partial x^2 + q. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) для прямоугольного лазерного импульса длительностью τ получено в работе /6/. Для прироста температуры там получена формула

$$\Delta T \approx 2\epsilon (\pi k \rho C_p \tau)^{-1/2}, \quad (3)$$

где ϵ — плотность поглощенной лазерной энергии на единицу площади.

Если считать, что разрушение зеркала наступает при температуре плавления алюминия T_m , то из (3) можно определить плотность энергии разрушения E_{th} алюминиевого покрытия:

$$E_{th} \approx T_m (\pi k \rho C_p \tau)^{1/2} / 2 (1 - R). \quad (4)$$

Здесь учтено, что $\Delta T \approx T_m$ и $\epsilon = EA \approx E(1 - R)$, где коэффициент поглощения зеркала A в первом приближении считается независимым от T .

По значениям, взятым из /7/ ($T_m = 660$ °С, $k \leq 2,8$ Вт/см · град, $\rho = 2,7$ г/см³, $C_p = 0,9$ Дж/г · град), можно оценить для КгF лазера с длительностью импульса 70 нс лучевую прочность "идеального" монолитного зеркала. Она составляет $\leq 3,4$ Дж/см², что сравнимо с порогом разрушения для зеркал алмазного точения ~ 2 Дж/см² /2/ и в 14 раз больше E_{th} для зеркал с термическим напылением /1/. Возникает вопрос, насколько правомерно рассматривать тепловой механизм разрушения.

Из (4) следует, что

$$E_{th} / \tau^{1/2} = \text{Const} \cdot (1 - R)^{-1}. \quad (5)$$

На рис. 2 построена зависимость обратного поглощения $(1 - R)^{-1}$ зеркала от длины волны, а также зависимость от длины волны плотности энергии разрушения E_{th} (из табл. 1), приведенной (с учетом зависимости $E_{th} \sim \tau^{1/2}$) к длительности импульса $\tau = 100$ нс. Здесь же нанесены результаты испытаний зеркал с термическим /1/ и с импульсным /2/ напылением. Видно, что ход кривых аналогичен. Таким образом, по

рог разрушения обратно пропорционален поглощению зеркал, и можно сделать заключение, что механизм разрушения алюминиевых зеркал УФ излучением является тепловым. Отсюда следует, что, определив испытанием лучевой прочности на одном из лазеров константу в уравнении (5) для каждого метода напыления, можно оценить порог разрушения при других длинах волн и длительностях импульсов.

Таблица 1

Лучевая прочность зеркал

Лазер	λ , нм	τ , нс	Отражение зеркала R, %	Диаметр пятна облучения ϕ , мм	Порог разрушения E_{th} , Дж/см ²
Nd-YAG, $3\omega/4/$	353	8	93	1	0,7
XeCl	308	120	93	2	3,5
KrF /1/	248	70	88	3	1,5
ArF /1/	193	60	73	50	0,5

В случае термоионного напыления плотность слоя Al приближается к плотности монокристаллического Al, к тому же облучение ионами вызывает разогрев подложки и взаимное внедрение материалов пленки и подложки, что резко улучшает адгезию [3]. Поэтому лучевая прочность таких зеркал приближается к лучевой прочности алюминиевых монокристаллических зеркал алмазного точения. В случае термического напыления слой Al на подложке обладает большой пористостью, что приводит к уменьшению ρ и k по сравнению с монокристаллическим Al [3], и в соответствии с (4) уменьшает E_{th} . Другой возможной причиной уменьшения E_{th} будет нагрев воздуха в порах напыленного слоя алюминия. За время лазерного импульса тепло дойдет до подложки, а ее теплопроводность меньше теплопроводности алюминия. Для зеркала с термоионным напылением это скажется меньше, так как существует переходный слой. Совокупностью этих факторов мы и объясняем существенное различие порогов лучевого разрушения E_{th} при термическом и термоионном методах нанесения покрытий.

Итак, измерена лучевая прочность алюминиевых зеркал, полученных различными методами; лучевая прочность алюминиевых зеркал определяется тепловым механизмом; возможен неразрушающий контроль лучевой прочности зеркал для каждой технологии; возможно повышение лучевой прочности при повышении отражения зеркал, улучшении адгезии и теплопроводности подложки.

Авторы благодарны Золотениной Н.С. и Хоц Г. Е. за изготовление алюминиевых покрытий, а также Сергееву П. Б. и Подсосонному А. С. за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клементов А. Д. и др. Квантовая электроника, 18, 2141 (1986).
2. Антипов Н. Н. и др. Тезисы докладов 7 Всесоюзной конференции по взаимодействию оптического излучения с веществом. Ленинград, 1988, с. 107.
3. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М., Энергоатомиздат, 1989.
4. Кругленко В. П. и др. Квантовая электроника, 7, 2136 (1980).
5. Цеснек Л. С., Сорокин О. В., Золотухин А. А. Металлические зеркала. М., Машиностроение, 1983, с. 44.
6. Wang V. et al. In: Laser Induced Damage in Optical Materials, 1972: NBS Spec. Publ., № 372, p. 183.
7. Таблицы физических величин под ред. Кикоина И. К. М., Атомиздат, 1976.

Поступила в редакцию 27 марта 1990 г.