

Г. В. МАКАРИЧЕВ

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ, ФОРМИРУЮЩИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО, НА ЕГО ЛУЧЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ

Определено влияние отклонения толщины слоев на лучевую прочность зеркала и порог его разрушения. Проанализированы ошибки в определении толщины слоев образцов диэлектрических зеркал и рассмотрено влияние распределения вектора электрической напряженности во внешних слоях этих зеркал на лучевую прочность.

Ключевые слова: резонатор лазера, лучевая прочность, диэлектрическое зеркало.

С начала 1990-х гг. лазеры, работающие в ближнем инфракрасном диапазоне, получили широкое распространение. В медицине лазерные системы с длиной волны 1,56 мкм оказались эффективными для нехирургической коррекции зрения, а также лазерной термопластики хрящей, в дальнометрии и для дистанционного зондирования такие лазеры применяются благодаря окну прозрачности атмосферы в диапазоне $\approx 1,5\text{—}1,75$ мкм.

Одним из ключевых элементов лазера являются многослойные диэлектрические зеркала (лазерные резонаторы). Существенной проблемой, возникающей при изготовлении таких зеркал, является нестабильность их лучевой прочности от партии к партии. По ОСТ-11 070.802-80 [1] лучевая прочность — свойство оптического материала (элемента) выдерживать кратковременное воздействие лазерного излучения и при этом выполнять функции и сохранять свои параметры после воздействия. Лучевая прочность характеризуется порогом лазерного повреждения при однократном или многократном (стойкость) воздействии лазерного излучения на один и тот же участок. Порог лазерного повреждения — статистически подтвержденное значение плотности энергии (мощности) лазерного излучения, при котором повреждение образцов происходит с заданной вероятностью.

В работах [2—4] исследовано влияние на лучевую прочность способов полировки деталей перед нанесением покрытия, способов чистки деталей перед установкой в вакуумную камеру, способов нанесения покрытия, а также технологических факторов, состояния вакуумной камеры, чистоты исходных пленкообразующих веществ и их стехиометрического состава, способов оплавления пленкообразующего материала, обработки деталей после нанесения покрытия. В настоящей работе совокупность перечисленных воздействующих факторов была принята постоянной. Целью работы являлось определение влияния ошибок при контроле толщины осаждаемых слоев, формирующих диэлектрическое зеркало, работающее на длине волны 1540 нм, на его лучевую прочность W . Также оценивалось влияние поглощения в слоях на лучевую прочность исследуемых зеркал. Рассмотренное зеркало состоит из слоев, сформированных диоксидами кремния и гафния на кварцевой подложке, конструкторская толщина слоев кратна $\frac{1}{4}\lambda_0$, толщина крайнего слоя кварца на границе воздух—система $\frac{1}{2}\lambda_0$, общее число слоев — 28. Двенадцать партий опытных образцов зеркал были изготовлены на установке Balzers ВАК-760, контроль при формировании слоев осуществлялся методом „кварцевого резонатора“.

Все образцы прошли глубокую шлифовку-полировку для удаления трещиноватого слоя, перед установкой в камеру они были очищены спиртоэфирной смесью. Детали в вакуумной камере подвергались прогреву до 230 °С, перед нанесением покрытия в течение пяти минут производилась обработка тлеющим разрядом. Диоксид гафния осаждался в атмосфере кисло-

рода при давлении в камере $P = 5 \cdot 10^{-5}$ мбар со средней скоростью 0,5 нм/с. Диоксид кремния (кварц) осаждался при давлении $P = 2 \cdot 10^{-5}$ мбар со средней скоростью 0,7 нм/с.

Измерения лучевой прочности проводились на испытательном стенде ИСПП-1-01-800 ЛЗ с использованием лазера ЛТС-154 (рабочая длина волны 1,54 мкм). Диаметр пятна воздействия $d = 0,28$ мм, площадь воздействия $S = 6,16 \cdot 10^{-4}$ см².

Измерения спектральных характеристик проводились на спектрофотометрах СФ-256-УВИ и СФ-256-БИК, для измерения отражения использовалась приставка зеркального отражения (ПЗО-10).

Поскольку показатель преломления кварца практически не зависит от условий осаждения ($n_{\text{SiO}_2} = 1,43 - 1,46$), по имеющимся спектральным кривым можно оценить дисперсию показателя преломления диоксида гафния. На рис. 1 приведены спектральные характеристики отражения R (кривая 2) и пропускания T (кривая 1). При изготовлении образцов измерялась масса осажденного вещества (метод „кварцевого резонатора“), поэтому значение расчетной длины волны (λ_{0p}) не совпадает с фактическим ($\lambda_{0ИК}$).

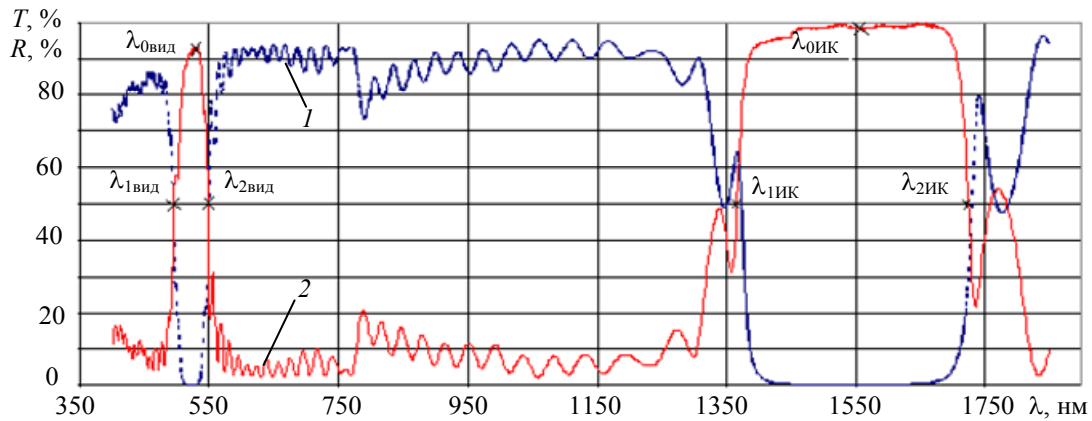


Рис. 1

Значение λ_0 определяется из соотношения $\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{2}{\lambda_0}$, где λ_1 и λ_2 — длина волны,

соответствующая 50 % значению коэффициента отражения вблизи зоны максимального отражения в инфракрасной и видимой области соответственно. Длина волны, соответствующая $\lambda_{0ИК}$, определяется из того же соотношения. Полученные значения $\lambda_{0ИК}$ и отклонения от ее расчетного значения $\lambda_{0p} = 1540$ нм приведены в табл. 1.

Таблица 1

Длина волны, нм	$W, \text{ ГВт/см}^2$					
	2,5	2,0	2,1	2,4	1,85	1,80
$\lambda_{0ИК}$	1528,8	1546,7	1555,9	1546,0	1589,6	1555,6
$\lambda_{0p} - \lambda_{0ИК}$	11,2	-6,7	-15,9	-6,0	-49,6	-15,6
$\lambda_{0вид}$	515,1	523,3	523,1	521	535	520,9
$\frac{1}{3} \lambda_{0вид} - \lambda_{0вид}$	-1,8	-10	-9,8	-7,7	-21,7	-7,6
Длина волны, нм	$W, \text{ ГВт/см}^2$					
	1,40	1,20	1,1	1,0	0,65	0,65
$\lambda_{0ИК}$	1548	1577	1609,1	1592,5	1637,4	1583
$\lambda_{0p} - \lambda_{0ИК}$	-8	-37	-69,1	-52,5	-97,4	-40,3
$\lambda_{0вид}$	527,1	538,3	540,6	534,5	548,9	550,8
$\frac{1}{3} \lambda_{0вид} - \lambda_{0вид}$	-13,8	-25	-27,3	-21,2	-35,6	-37,5

Видно, что разница в величине λ_0 не превышает 7 %, однако лучевая прочность различается более чем в четыре раза.

На рис. 2 приведена зависимость лучевой прочности от смещения центра зоны максимального отражения от расчетной длины волны $\Delta\lambda_0$ (точки — $\Delta\lambda_{0\text{ИК}}$, крестики — $\Delta\lambda_{0\text{вид}}$).

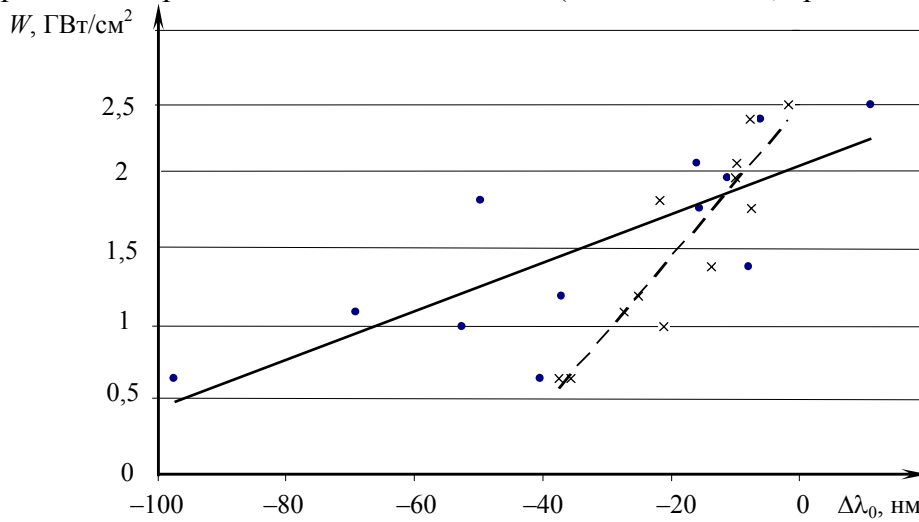


Рис. 2

Из табл. 1 и рис. 2 видно, что при больших смещениях максимумов отражения Δ от $\lambda_0=1540$ нм наблюдается корреляция между лучевой прочностью и смещением, а при малых смещениях необходимо искать параметр, который позволил бы установить его связь с лучевой прочностью.

Образцы были изготовлены с использованием диоксида гафния из разных партий. Оценка изменения показателя преломления в зависимости от конкретной партии диоксида гафния была проведена следующим образом. Для зоны высокого отражения в видимой области было рассчитано значение $\lambda_{0\text{вид}}$ аналогично тому, как это было сделано ранее для $\lambda_{0\text{ИК}}$. Так как известно, что центр следующей зоны высокого отражения находится на длине волны, равной $\frac{1}{3}\lambda_0$, сравнив отношение $\lambda_{0\text{ИК}}/\lambda_{0\text{вид}}$ с числом 3, можно оценить разницу в показателях преломления (1,88—2,0) диоксида гафния из различных партий.

Поглощение можно оценить, сравнив смещение экстремумов отражения и пропускания в зеркалах, поскольку наличие поглощения в слоях приводит к смещению Δ по шкале длин волн экстремумов отражения R и пропускания T . Для непоглощающих материалов $T + R = 1$, положения экстремумов совпадают $\frac{dT}{d\lambda} + \frac{dR}{d\lambda} = 0$ и, следовательно, если $\frac{dT}{d\lambda} = 0$, то и $\frac{dR}{d\lambda} = 0$.

Для поглощающих материалов

$$T + R + A = 1, \quad \frac{dT}{d\lambda} + \frac{dR}{d\lambda} + \frac{dA}{d\lambda} = 0,$$

где A — коэффициент поглощения, если $\frac{dT}{d\lambda} = 0$, то $\frac{dR}{d\lambda} + \frac{dA}{d\lambda} = 0$, следовательно

$\frac{dT}{d\lambda} = -\frac{dA}{d\lambda} \neq 0$. Оценка поглощения проводилась путем измерения смещения ярко выраженных экстремумов отражения и пропускания в диапазонах 700—800 нм и 1300—1400 нм,

которое составляет для различных образцов 0,1—1,0 % при допустимой абсолютной погрешности установки длин волн на спектрофотометре ± 1 нм. На основе полученной оценки можно сделать вывод, что поглощение в образцах примерно одинаково и не объясняет разброса в значениях лучевой прочности.

Контроль толщины слоев по массе осаждаемого вещества является косвенным методом, поэтому его использование приводит к отклонению полученных значений оптической толщины слоев от заданных значений (в свою очередь, спектральные кривые отражения и пропускания искажаются). Эти искажения не влияют на значение коэффициента отражения на длине волны 1540 нм (λ_0), поэтому они не учитываются. Разброс значений порога разрушения при примерно постоянных технологических факторах не может быть объяснен. В настоящей работе была предпринята попытка связать нарушения в конструкции и лучевую прочность зеркал. Нарушения конструкции зеркал характеризуют отклонения в положении коротковолновых ($\lambda_{0\text{вид}}$) и длинноволновых ($\lambda_{0\text{ИК}}$) экстремумов отражения (см. рис. 2). Как видно из этого рисунка, существует корреляция между лучевой прочностью и величинами $\lambda_{0\text{вид}}$, $\lambda_{0\text{ИК}}$; $\Delta\lambda_{0\text{вид}}$ лучше описывает эту связь: $W_{\text{ИК}} = -0,02\Delta - 128$, $W_{\text{вид}} = -0,05\Delta - 50$. Этот параметр, хотя хорошо описывает процесс разрушения, не позволяет определить, что влияет на него.

Известно, что в зеркалах происходит наложение падающей волны на отраженную, возникает стоячая волна, обладающая характерным расположением чередующихся максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) амплитуды [5]. Отклонение оптической толщины слоев от $\frac{1}{4}\lambda_0$ приводит к тому, что значение амплитуды электрической напряженности на границах раздела слоев в поверхностных слоях увеличивается, существенно повышая вероятность пробоя (и, следовательно, уменьшая значение лучевой прочности). Наибольший интерес представляют внешние слои, поскольку с удалением от граничащего с воздухом слоя значение амплитуды электрической напряженности резко падает. Для оценки влияния отклонения оптической толщины слоев от заданных значений на лучевую прочность необходимо, рассмотрев спектральные зависимости отражения и пропускания, для каждого образца внести такие изменения в расчетную толщину слоев, чтобы приблизить теоретическую кривую (рис. 1) к полученным. Для этого был рассмотрен некоторый набор наиболее вероятных предположений, позволяющих моделировать возникновение ошибок, и были получены „модифицированные“ конструкции, спектральные кривые которых приближены к полученным экспериментально. Полученные конструкции позволили оценить значение вектора напряженности электрического поля на границах крайних слоев исходя из известных граничных условий (табл. 2).

Таблица 2

Образец	W , ГВт/см ²	E , о.е.			
		воздух—1-й слой	1-й слой—2-й слой	2-й слой—3-й слой	3-й слой—4-й слой
1	2,5	0,09	0,02	0,75	0,03
2	2,4	0,17	0,01	0,73	0,01
3	2,1	0,23	0,02	0,74	0,01
4	2,0	0,41	0,09	0,74	0,06
5	1,85	0,29	0,09	0,73	0,07
6	1,8	0,37	0,03	0,72	0,02
7	1,4	0,60	0,13	0,69	0,09
8	1,2	0,46	0,22	0,73	0,16
9	1,1	0,48	0,23	0,76	0,17
10	1,0	0,47	0,19	0,73	0,18
11	0,65	0,68	0,41	0,72	0,24
12	0,65	0,71	0,07	0,72	0,05

Как видно из табл. 2, наибольшее влияние на лучевую прочность оказывает вектор напряженности электрического поля на границе раздела воздух—первый слой зеркала. На рис. 3 приведена зависимость лучевой прочности W (а) и $\lg(W)$ (б) от относительной напряженности E электрического поля стоячей волны на границе раздела воздух—

диэлектрическая система. Как видно из рис. 3, величина лучевой прочности экспоненциально зависит от амплитуды напряженности электрического поля. Линейная зависимость на рис. 3, б позволяет утверждать, что $\lg(W) = 1,13E + 0,6$.

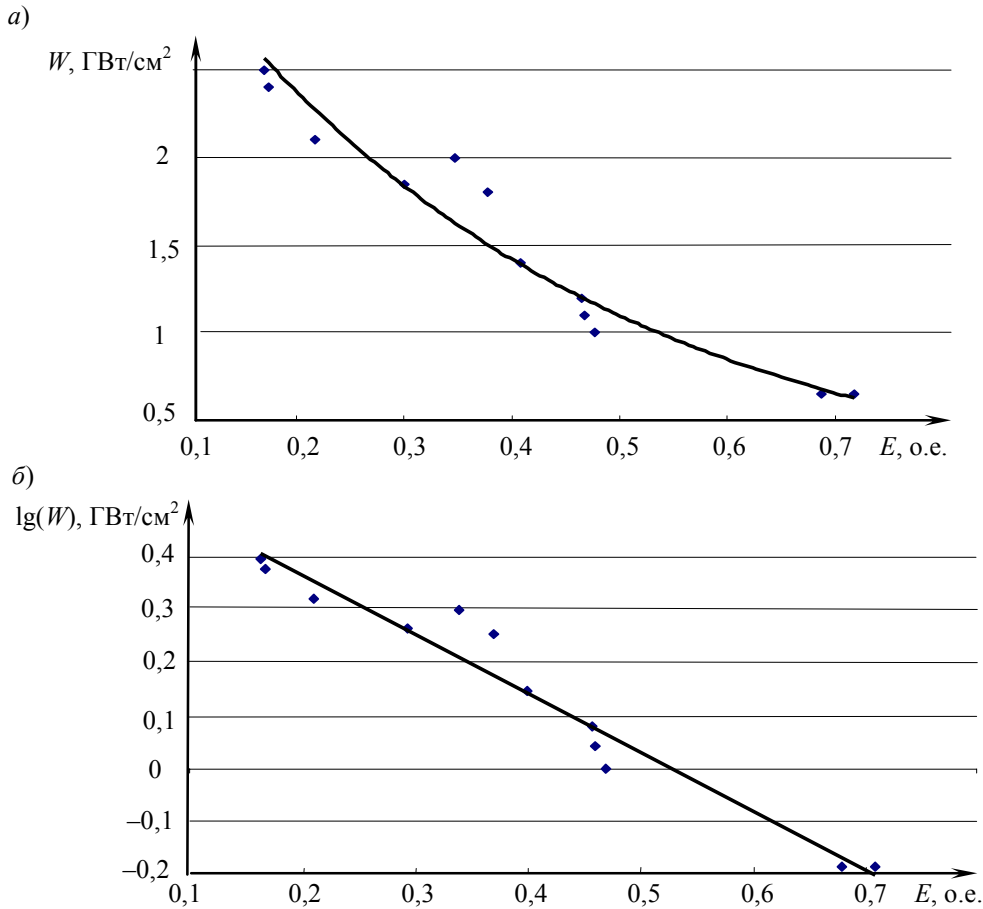


Рис. 3

В работе были исследованы спектральные кривые пропускания и отражения образцов диоксида гафния из 12 партий 28-слойных диэлектрических зеркал. Результаты анализа кривых позволяют сделать выводы о величине и дисперсии показателей преломления пленкообразующих материалов и определить принадлежность диоксида гафния к определенной партии. Расчеты показали, что дисперсия показателя преломления пленкообразующего материала из разных партий не оказывает влияния на пороговое значение лучевой прочности образцов. Проведенная оценка поглощения по смещению экстремумов отражения и пропускания позволяет утверждать, что в рассмотренных образцах оно незначительно и не оказывает существенного влияния на лучевую прочность, поскольку значения поглощения близки для всех образцов.

Наличие характерных искажений спектральных кривых, вызванных особенностями контроля толщины слоев в процессе осаждения, позволило определить экспериментально реализованную конструкцию покрытия. С использованием полученных конструкций и известных граничных условий были рассчитаны значения вектора напряженности на границах первых трех слоев, начиная от среды, из которой падает свет. Полученные значения напряженности электрического поля на первых четырех границах раздела многослойного диэлектрического зеркала позволяют судить о влиянии ошибок в полученной толщине слоев, допущенных в процессе осаждения. Установлена связь между величиной смещения экстремумов $\Delta\lambda_0$ и напряженностью электрического поля на границе воздух—диэлектрическая система.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ11-070.802-80. Материалы оптические и элементы твердосплавных лазеров. Метод определения лазерной прочности.
2. *Milam D., Lowdermilk W. Rainer H., F., Swain J. E., Carniglia C. K., and Hart T. T.* Influence of deposition parameters on laser-damage threshold of silica-tantala AR coatings // *Appl. Opt.* 1982. Vol. 21. P. 3689—3694.
3. *Зверев Г. М., Сидорюк О. Е., Скворцов Л. А.* Влияние процессов адсорбции воды на лазерную прочность покрытий из двуокиси титана // *Квантовая электроника.* 1981. Т. 8, № 10. С. 2274—2276.
4. *Walker T. W., Guenther A. H., Nielsen P. E.* Induced Damage to Thin Film Optical Coatings // *IEEE J. of Quantum Electronics.* 1981. Vol. QE-17, № 10.
5. *Зверев Г. М., Колодный Г. Я., Порядин Ю. Д.* О стойкости интерференционных зеркал к действию лазерного излучения // *Квантовая электроника.* 1978. Т. 5, № 1. С. 44—49.

Сведения об авторе

Глеб Вячеславович Макаричев — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: g_retired@bk.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.