

04;05;07;11

## Взаимодействие интенсивного лазерного ИК излучения с защитными покрытиями $a\text{-C:H}$

© Е.А. Коншина

Всероссийский научный центр (ГОИ им. С.И. Вавилова),  
199034 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 16 апреля 1997 г.)

Проанализированы и систематизированы результаты определения порогов оптического пробоя воздуха вблизи поверхности лазерных медных зеркал с защитным покрытием  $a\text{-C:H}$  при воздействии интенсивного импульсного излучения с длиной волны  $10.6 \mu\text{m}$ . Показано отсутствие корреляции между порогом пробоя зеркала с покрытием, его коэффициентом отражения и порогом пробоя исходной поверхности меди. Даны экспериментальные зависимости порога оптического пробоя зеркал с покрытием от толщины и скорости осаждения  $a\text{-C:H}$ , а также времени хранения зеркал. Сделаны оценки подъема температуры поверхности в зоне облучения для случая идеального адгезионного контакта и расчет порога разрушения покрытия в случае нарушенного адгезионного контакта зеркало–покрытие. Обсуждается влияние на порог оптического пробоя свойств покрытия  $a\text{-C:H}$  и условий на границе полированная металлическая поверхность–защитное покрытие.

### Введение

Важным вопросом в создании оптических элементов лазеров является взаимодействие лазерного излучения с веществом. Пассивные элементы (окна, зеркала), используемые в газовых средах импульсных  $\text{CO}_2$  лазеров, испытывают действие интенсивных световых потоков лазерного излучения. Оптический пробой и образование плазмы у их поверхности вызывают изменение режима генерации и нарушают функционирование лазерной системы. Поэтому лучевую прочность оптического элемента определяют уровнем плотности мощности излучения, соответствующим порогу плазмообразования. Последний зависит не только от параметров лазерного излучения (формы, длительности, частоты чередования импульсов и размеров пятна облучения), но также окружающей среды, состояния поверхности и материала оптического элемента [1]. В лазерной технике широко используют медные зеркала, которые имеют высокие коэффициенты отражения и пороги оптического пробоя. Однако их применение ограничено низкой коррозионной стойкостью и механической прочностью. Срок службы зеркал может быть увеличен с помощью защитных покрытий. Перспективность использования твердых, химически инертных и прозрачных в ИК области алмазоподобных покрытий аморфного гидрогенизированного углерода ( $a\text{-C:H}$ ) в качестве защитных от воздействия интенсивного излучения на длине волны  $10.6 \mu\text{m}$  для лазерных медных зеркал была показана впервые в работе [2]. Зеркала с защитным покрытием  $a\text{-C:H}$  имели высокий порог пробоя. Такое покрытие не вызывало изменения формы оптической поверхности и коэффициента отражения медного зеркала, снижало шероховатость исходной поверхности и существенно повышало ее механическую прочность и коррозионную стойкость. Дальнейшие исследования показали, что условия плазмообразования у поверхности

зеркал с покрытием  $a\text{-C:H}$  зависят от толщины последнего и могут снижаться со временем [3]. Однако природа наблюдаемых явлений была до конца неясна.

В этой работе дается систематический анализ влияния различных факторов на порог оптического пробоя медных зеркал с защитным покрытием  $a\text{-C:H}$ . Проводятся оценочные расчеты температуры поверхности в пятне облучения и порогов разрушения покрытия в зависимости от его толщины с учетом адгезионного контакта на границе зеркало–покрытие. Обсуждаются влияние свойств  $a\text{-C:H}$  и условий на границе полированная металлическая поверхность–защитное покрытие на порог приповерхностного оптического пробоя.

### Методы и результаты эксперимента

Для получения защитного покрытия  $a\text{-C:H}$  был использован метод химического осаждения паров углеводородов в плазме тлеющего разряда на постоянном токе [4]. Покрытие осаждали на поверхность полированных медных зеркал размером от 40 до 60 mm при температуре окружающей среды. При этом 1/4 или 1/2 часть поверхности зеркала оставляли без покрытия для проведения сравнительных испытаний. Поверхность зеркала перед осаждением покрытия обрабатывали плазмой тлеющего разряда инертного газа с целью ее очистки. Для оптимизации условий получения покрытия  $a\text{-C:H}$  варьировали параметры процесса осаждения: давление в вакуумной камере в интервале от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $1 \cdot 10^{-1}$  Pa, межэлектродное напряжение от 600 до 1400 V и содержание ацетилена в смеси с инертным газом. В качестве инертного газа использовали криптон и аргон. Толщину покрытия изменяли в интервале  $0.03\text{--}0.7 \mu\text{m}$ . Для ее контроля использовали микроинтерферометр МИИ-4М с относительной ошибкой измерения менее 10%.



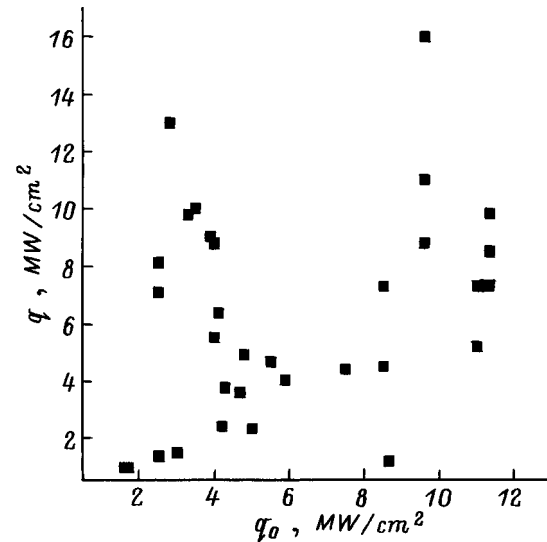
**Рис. 1.** Гистограмма плотностей мощности импульсного лазерного ИК излучения, соответствующих порогу оптического пробоя.

Для определения устойчивости зеркал с покрытием  $a\text{-C:H}$  к воздействию лазерного излучения определяли плотность мощности, соответствующую порогу оптического пробоя вблизи их поверхности. За величину порога пробоя принимали минимальное значение плотности мощности лазерного излучения, соответствующее появлению факела и полученное при серии испытаний в разных участках поверхности зеркала. Испытания проводили на длине волны  $10.6\ \mu\text{m}$  в воздухе атмосферного давления с помощью электроразрядного  $\text{CO}_2$  лазера [5] с длительностью импульса  $15\ \mu\text{s}$  по основанию и  $10\ \mu\text{s}$  по ширине. Диаметр пятна облучения был  $0.3\ \text{cm}$ . Часть энергии излучения отводили на измеритель энергии лазерных импульсов ИМО-2.

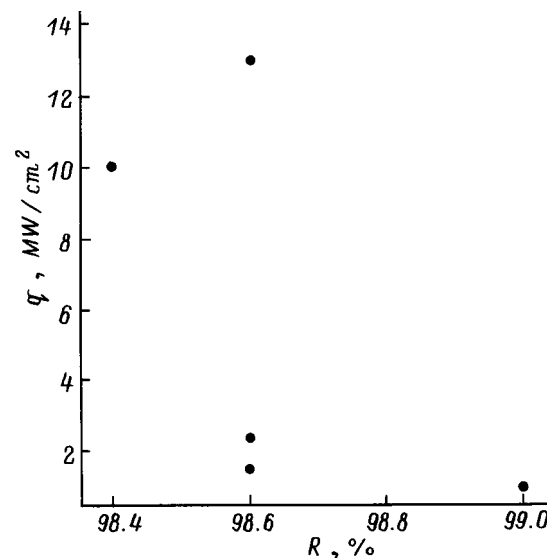
Гистограмма значений плотности мощности  $q$  лазерного импульсного ИК излучения, соответствующих порогу оптического пробоя у поверхности медного зеркала с покрытием  $a\text{-C:H}$ , для числа образцов  $N = 32$  приведена на рис. 1. Среднее, максимальное и минимальное значения плотности мощности были равны  $6.2$ ,  $16$  и  $1\ \text{MW/cm}^2$  соответственно.

Пороговые значения плотностей мощности излучения зеркал с покрытием в зависимости от порогов пробоя исходной поверхности зеркал без покрытия ( $q_0$ ) показаны на рис. 2. Можно видеть, что эти значения имеют случайный характер и какая-либо закономерность в распределении точек на рис. 2 отсутствует. Покрытие могло как повышать в несколько раз порог оптического пробоя поверхности зеркала, так и снижать его в отдельных случаях. Численная обработка значений порогов пробоя, приведенных на рис. 2, дала коэффициент корреляции  $\sim 0.3$  при объеме выборки 32.

Были проведены измерения коэффициента отражения медного зеркала с покрытием  $a\text{-C:H}$  ( $R$ ) на длине волны  $10.6\ \mu\text{m}$  с помощью многоходового рефрактометра с погрешностью  $\pm 0.3\%$ . Измерения показали, что  $R = 98.4 - 99.0\%$  и его отклонение от коэффициента отражения исходной поверхности медного зеркала были в пределах ошибки измерения. Пороговые значения плотности мощности  $q$  зеркал с покрытием  $a\text{-C:H}$  в зависимости от коэффициента отражения поверхности элемента  $R$  приведены на рис. 3. Можно видеть, что корреляция между этими величинами отсутствует. Защитное покрытие  $a\text{-C:H}$  предохраняет поверхность медного зеркала от окисления и позволяет сохранять его



**Рис. 2.** Распределение значений плотности мощности  $q$  импульсного лазерного ИК излучения, соответствующей порогу оптического пробоя, в зависимости от порога пробоя поверхности меди без покрытия  $q_0$ .

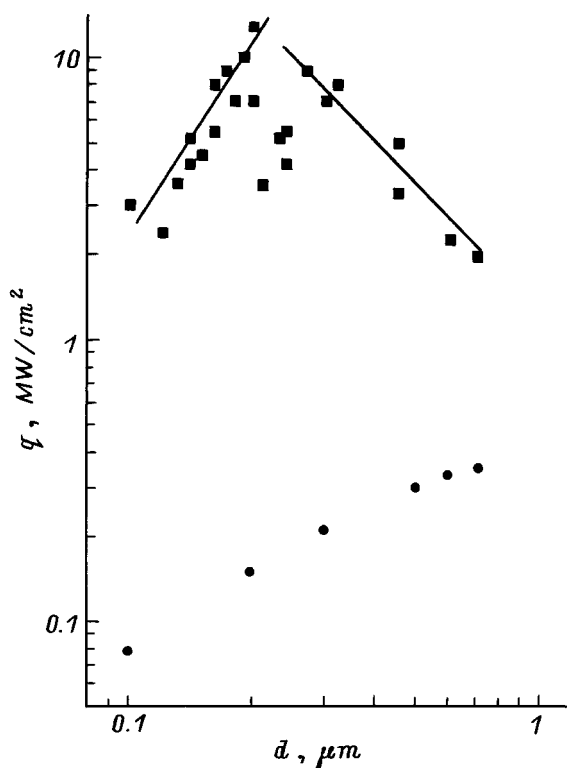


**Рис. 3.** Порог оптического пробоя зеркал с покрытием  $a\text{-C:H}$  в зависимости от их коэффициента отражения.

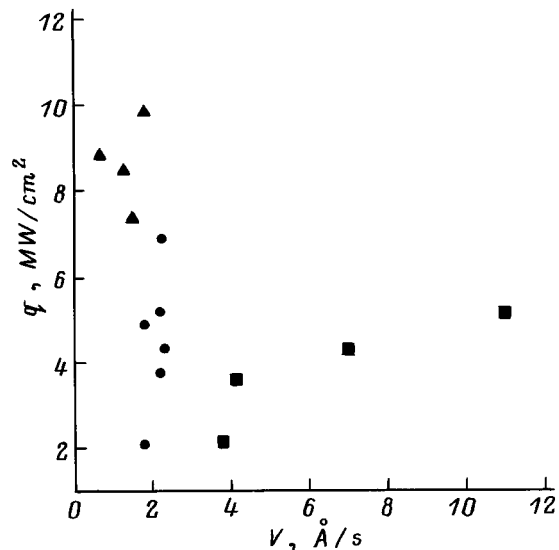
коэффициент отражения без изменения при хранении в течение нескольких лет.

Пороговые плотности мощности медных зеркал с покрытием  $a$ -C:H в зависимости от его толщины ( $d$ ) показаны на рис. 4. Несмотря на значительный разброс точек, можно видеть, что в узком интервале толщин покрытия от  $0.1$  до  $0.2 \mu\text{m}$  наблюдается тенденция к росту порога пробоя и далее с увеличением толщины происходит его снижение. Максимум на экспериментальной зависимости свидетельствует о влиянии по крайней мере двух конкурирующих процессов на развитие оптического пробоя у поверхности зеркала с покрытием  $a$ -C:H, один из которых способствует повышению порога, а другой приводит к его снижению.

Попытки установить зависимость порога оптического пробоя зеркала с покрытием  $a$ -C:H от технологических параметров процесса осаждения последнего (давления газа в вакуумной камере  $p$ , межэлектродного напряжения  $u$  и ионного тока на подложку  $i$ ) не увенчались успехом. Пороги пробоя покрытий  $a$ -C:H толщиной  $0.13 \pm 0.01 \mu\text{m}$  в зависимости от скорости осаждения  $v$  приведены на рис. 5. Порог пробоя  $q$  изменялся от  $2$  до  $5.2 \text{ MW/cm}^2$  при увеличении  $v$  от  $4$  до  $12 \text{ \AA/s}$  у покрытий, полученных из ацетилена при  $u = 800 - 900 \text{ V}$  в



**Рис. 4.** Зависимости пороговых плотностей мощности импульсного ИК излучения от толщины защитного покрытия: ■ — для экспериментальных порогов приповерхностного пробоя медных зеркал с покрытием  $a$ -C:H, ● — для расчетных значений порогов лазерного разрушения покрытия  $a$ -C:H в случае нарушенного адгезионного контакта его с зеркалом.



**Рис. 5.** Плотности мощности порогов пробоя в зависимости от скорости их осаждения: ■ — из ацетилена при  $u = 800 - 900 \text{ V}$ ,  $i = 2 - 11 \text{ mA}$  и  $p = 1 - 7 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ ; ● — из смеси ацетилена с аргоном (50%) при  $u = 900 - 1000 \text{ V}$ ,  $i = 4 - 8 \text{ mA}$  и  $p = 1.3 - 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ ; ▲ — из смеси ацетилена с криптоном (66%) при  $u = 1200 - 1400 \text{ V}$ ,  $i = 20 \text{ mA}$  и  $p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ .

интервале  $i = 2 - 11 \text{ mA}$  и  $p = 1 - 7 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ . Понижение скорости осаждения до  $v = 2.0 \pm 0.2 \text{ \AA/s}$  при разбавлении ацетилена аргоном (50%) и  $u = 900 - 1000 \text{ V}$ ,  $i = 4 - 8 \text{ mA}$ ,  $p = 1.3 - 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$  приводило к повышению  $q$  до  $7 \text{ MW/cm}^2$ . При скорости  $v < 2 \text{ \AA/s}$  для покрытий, полученных из смеси ацетилена с криптоном (66%) при  $u = 1200 - 1400 \text{ V}$ ,  $i = 20 \text{ mA}$ ,  $p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ , величина  $q$  возрастала до  $11 \text{ MW/cm}^2$ . Полученная зависимость  $q(v)$  свидетельствует о том, что уменьшение скорости осаждения  $a$ -C:H в результате понижения концентрации ацетилена в плазме способствует повышению порога пробоя зеркала с защитным покрытием.

Площадь разрушения  $s$  на поверхности зеркала с покрытием  $a$ -C:H в результате оптического пробоя могла изменяться от  $\sim 0.2 \cdot 10^{-2}$  до  $\sim 4 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2$ . Изменение  $s$  в зависимости от толщины покрытия  $d$  и плотности мощности излучения  $d$  для покрытий, полученных из смеси ацетилена с криптоном (66%) в интервале скоростей осаждения  $v = 0.7 - 1.8 \text{ \AA/s}$ , показано на рис. 6. Можно видеть, что при  $d < 0.2 \mu\text{m}$   $s$  возрастает пропорционально увеличению  $q$ . У покрытий, имеющих структурированный спектр поглощения с несколькими максимумами, лежащими выше энергии  $\sim 1.5 \text{ eV}$  (рис. 7, кривая 1), в местах воздействия интенсивного лазерного излучения происходили необратимые изменения цвета в пятне облучения. Подобные изменения цвета исследуемых покрытий мы наблюдали при нагреве их в вакууме до  $T = 420^\circ\text{C}$ . Как следует из результатов ИК и КР спектроскопии, явление смещения максимума в спектре электронного поглощения в сторону более низких энер-

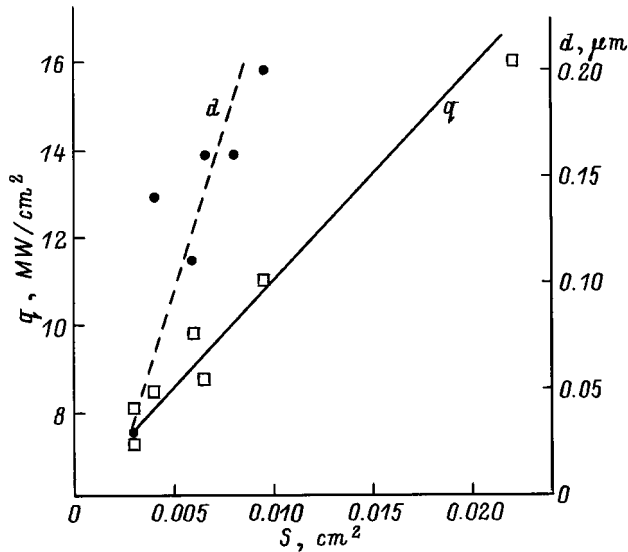


Рис. 6. Площадь разрушения поверхности зеркала в результате оптического пробоя в зависимости от плотности мощности порога пробоя и толщины покрытия.

гий вызвано структурными изменениями, связанными с переходом атомов углерода из  $sp$ - в  $sp^2$ -валентное состояние, укрупнением полициклических ароматических групп, входящих в структуру  $a$ -C:H [6]. Термографические исследования углеродных конденсатов, полученных в газовом разряде, показали, что в интервале температур 250–400°C наблюдается экзотермический эффект, не сопровождающийся изменением массы вещества и связанный со структурными изменениями, а при температуре выше 450°C идет обычная окислительная реакция, характерная для углеродсодержащих материалов [7]. Для покрытий  $a$ -C:H серо-черного цвета, имеющих бесструктурный спектр поглощения с максимумом  $\sim 1.5$  eV (рис. 7, кривая 2), описанные выше термохромные изменения не характерны. В центре разрушения, как правило, покрытие выгорало и наблюдалась эрозия поверхности меди. Края разрушения покрытия имели локальные очаги разрушения малого размера. Полное разрушение покрытия возможно при температуре 1000°C в результате термодеструкции  $a$ -C:H с последующим окислением выделяющихся углеводородных продуктов. Таким образом, по характеру разрушений покрытия, наблюдаемых в результате оптического пробоя, можно заключить, что температура поверхности в пятне облучения может изменяться от 420 до 1000°C.

Результаты многократных испытаний двух зеркал с покрытием серо-черного цвета в течение 1 года показаны на рис. 8. Образцы хранились в комнатной атмосфере. Начальные значения  $q = 10$  и  $13$  MW/cm<sup>2</sup> порога оптического пробоя у поверхности зеркала с покрытием были в несколько раз выше порогов пробоя исходной поверхности медного зеркала  $q_0$  и снижались за год до значений, близких к первоначальным для зеркал 1.2

и 5.9 MW/cm<sup>2</sup> соответственно. Подобное снижение порога пробоя при хранении зеркал с покрытием наблюдалось и на других образцах. Учитывая стабильность свойств  $a$ -C:H, снижение порогов пробоя со временем может быть вызвано изменением условий на границе зеркало-покрытие. В пользу этого свидетельствовало увеличение площади разрушения при одновременном снижении порога пробоя, наблюдаемое в результате испытаний.

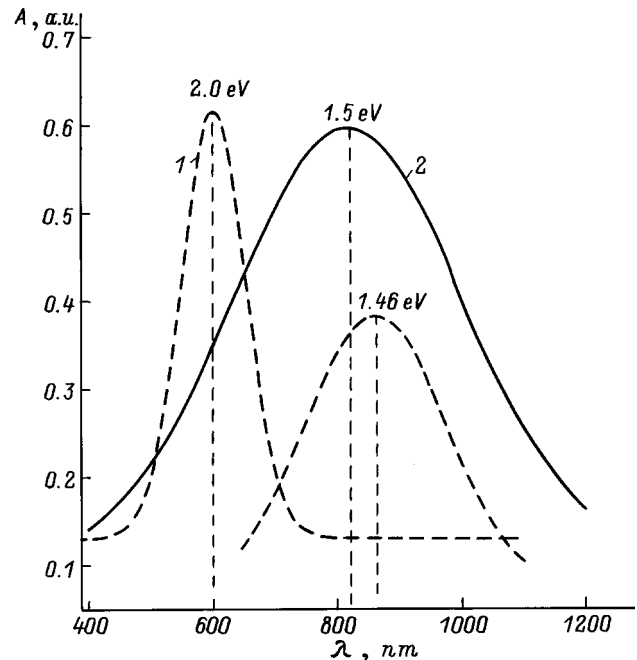


Рис. 7. Спектральные зависимости поглощения зеркал.

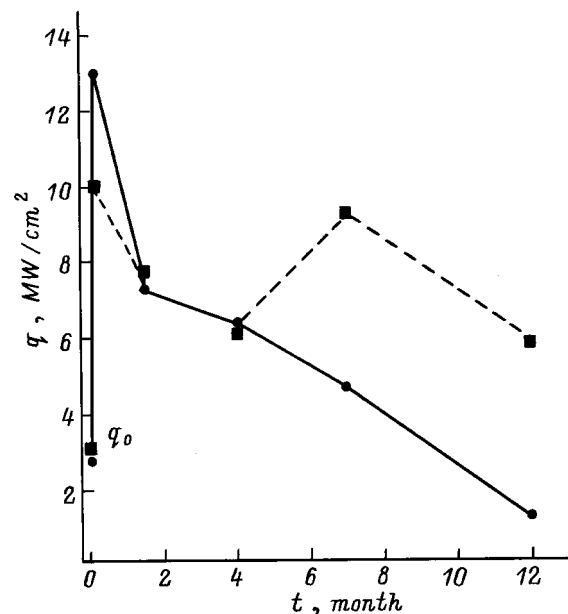


Рис. 8. Изменение величины порога оптического пробоя  $q$  медных зеркал с защитным  $a$ -C:H покрытием в зависимости от времени  $t$  их хранения в комнатных условиях.

## Результаты расчетов

Для выяснения влияния границы раздела зеркало–покрытие а-С:Н на порог пробоя были сделаны расчеты подъема температуры в пятне облучения импульсным ИК излучением и порога разрушения покрытия в зависимости от адгезионного контакта. На границе между зеркалом и покрытием а-С:Н действуют силы ван-дер-ваальса [8]. При отсутствии адгезионного контакта между ними покрытие должно нагреваться излучением в условиях тепловой изоляции, когда тепловое сопротивление  $r \rightarrow \infty$ . Напротив, при сильном сцеплении  $r \rightarrow 0$  и тепловой контакт можно считать идеальным [9].

Рассмотрим случай идеального теплового контакта покрытия с поверхностью меди. Глубина проникновения ИК излучения  $\delta = 1/\alpha$ , где  $\alpha$  — линейный коэффициент поглощения. Для исследуемого покрытия а-С:Н при вариации содержания ацетилен в смеси с инертным газом коэффициент экстинкции  $k = 2.5 - 1.6 \cdot 10^{-2}$  на длине волны  $10.6 \mu\text{m}$  при  $n = 2.0 - 2.4$  [10]. В этом случае  $\alpha = 300 - 190 \text{ cm}^{-1}$ , а  $\delta$  не превышает  $44 \mu\text{m}$ , что значительно больше толщины покрытия. Таким образом, температура на поверхности покрытия будет соответствовать температуре поверхностного слоя меди, когда  $r = 0$ . Для оценки температуры поверхности  $T$  медных зеркал с  $\alpha = 10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-1}$  была использована формула, описывающего распространение тепла в полубесконечном слое вещества, ограниченном плоскостью  $Z = 0$ , на которую падает излучение,

$$T(0, \tau) = \frac{2q(1-R)\sqrt{\chi R}}{K\sqrt{\pi}}, \quad (1)$$

где  $q$  — интенсивность излучения, падающего на поверхность зеркала;  $K$  — коэффициент температуропроводности;  $\chi$  — коэффициент теплопроводности.

Для расчета были использованы экспериментальные значения пороговых плотностей мощности и коэффициентов отражения зеркал с покрытием, приведенные на рис. 3. Величины  $K = 0.913 \text{ cal/sm} \cdot \text{s} \cdot \text{degree}$  и  $\chi = 1.1 \text{ cm}^2/\text{s}$  для меди были взяты из [11]. Расчетное значение температуры поверхностного слоя зеркала с покрытием а-С:Н для случая идеального адгезионного контакта между ними не превышает  $200^\circ\text{C}$  для зеркала с  $R = 98.6\%$  при  $q = 13 \text{ MW/cm}^2$ .

В случае когда адгезионный контакт отсутствует, а  $r \rightarrow \infty$ , поток излучения, падающий на поверхность, должен полностью поглощаться покрытием толщиной  $d$  за время действия лазерного импульса  $\tau$ . Значение плотности мощности, обеспечивающей нагрев покрытия до температуры разрушения, можно определить как

$$q = q^*/A(d), \quad (2)$$

где  $q^*$  — плотность мощности потока излучения, поглощенного покрытием;  $A(d)$  — коэффициент поглощения покрытия.

Без учета отвода тепла в медное зеркало

$$q^* = \frac{TC\rho d}{M\tau}, \quad (3)$$

где  $C$  — теплоемкость,  $\rho$  — плотность,  $M$  — молекулярный вес углеродного покрытия.

В случае прозрачной пленки на слабый монотонный рост  $A(d)$  с увеличением толщины покрытия накладывается осцилляция, связанная с интерференцией света в слое. При простейшем теоретическом описании поглощательной способности медное зеркало–а-С:Н можно воспользоваться известным решением классической задачи электродинамики об отражении света от плоского однородного слоя с резкими границами раздела с окаймляющими средами, характеризуемыми, как и слой, частотно-зависящими оптическими постоянными  $n$  и  $k$  [12]. Для тонких пленок ( $d \ll \lambda/n$ ;  $d \ll k^{-1}$ ) из решения, в частности, следует

$$A(d) \approx A_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2, \quad (4)$$

где

$$A_0 = 4n_2 / [(n_2 + 1)^2 + k_2^2]. \quad (5)$$

Для случая когда коэффициент экстинкции пленки  $k_1 \ll n_1$ ,

$$\beta_1 \approx \pi A_0^2 / \lambda \cdot k_2 / n_2 (n_1^2 - 1), \quad (6)$$

$$\beta_2 \approx (\pi A_0 / \lambda)^2 (n_1^2 - 1) / n_2 (n_2^2 + k_2^2 - n_1^2). \quad (7)$$

После подстановки оптических постоянных для покрытия а-С:Н  $n_1 = 2$  и  $k_1 = 2.5 \cdot 10^{-2}$  на длине волны  $10.6 \mu\text{m}$  [10] и медного зеркала  $n_2 = 11$  и  $k_2 = 60.6$  [13] в формулы (5), (6) и (7) получили

$$A(d) = 0.012 = 7.05d + 1.3 \cdot 10^6 d^2. \quad (8)$$

С помощью формул (3) и (8) были рассчитаны плотности падающего потока ИК излучения  $q$ , нагревающие покрытие а-С:Н до температуры его испарения при условии отсутствия адгезионного и теплового контакта в интервале  $d$  от  $0.1$  до  $0.7 \mu\text{m}$ . Для расчета использовали следующие значения:  $C = 0.17 \text{ cal/mol} \cdot \text{deg}$  [7],  $\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$ ,  $M = 12 \text{ g/mol}$ ,  $\tau = 15 \mu\text{s}$ . За температуру разрушения покрытия была принята температура, при которой происходит его полная деструкция и переход в газообразное состояние,  $T = 1000^\circ\text{C}$ . Полученная расчетная зависимость порога разрушения покрытия а-С:Н приведена на рис. 4. Согласно расчету, плотность мощности, необходимая для разрушения покрытия а-С:Н при нарушенном адгезионном контакте, монотонно возрастает с ростом толщины покрытия. При толщине покрытия, равной  $0.7 \mu\text{m}$ , значение плотности мощности, необходимой для полного разрушения покрытия, достигало  $0.35 \text{ mW/cm}^2$  и было на порядок ниже значений порога оптического пробоя, полученных экспериментально.

## Обсуждение результатов

Механизм приповерхностного оптического пробоя при облучении металлических зеркал тесно связан с состоянием полированной поверхности: присутствием адсорбированных примесей, внедренных частиц и несовершенством самой основы. Находясь в плохом тепловом контакте с металлом, такие дефекты в поле излучения могут быстро нагреваться и служить источником ионизированных паров и эмиссионных потоков частиц. В результате появления затравочных электронов и легко ионизируемого вещества в окружающей среде облегчаются условия развития электронной лавины — наступления оптического пробоя [14]. Нанесение на металлическую поверхность защитного покрытия  $a-C:H$  может изменять механизм взаимодействия импульсного ИК излучения с зеркалом. Отсутствие корреляции между порогами пробоя зеркала с покрытием и полированной поверхности меди (рис. 2), а также коэффициентом его отражения (рис. 3) свидетельствуют о различии условий плазмообразования у поверхности металла и защитного покрытия  $a-C:H$ . Влияние свойств покрытия на взаимодействие с интенсивным ИК излучением проявляется в зависимости порога оптического пробоя от толщины (рис. 4) и скорости его осаждения (рис. 5).

Исследование с помощью адсорбционно-эллипсометрического метода показало, что покрытия  $a-C:H$  с  $n > 2.0$  отличаются низкой пористостью [15]. Они не изменяют своих оптических свойств и защищают поверхность зеркала от окислительного воздействия окружающей среды. Такое покрытие должно блокировать поверхность металла, препятствуя выходу эмиссионных потоков с его поверхности, при воздействии импульсного лазерного излучения. Этим можно объяснить рост порога пробоя зеркала с увеличением толщины покрытия  $a-C:H$  до  $0.2 \mu m$  на рис. 4. Снижение порога пробоя при дальнейшем увеличении толщины покрытия (рис. 4) и при хранении зеркал с покрытием (рис. 8) может быть вызвано изменением условий на границе зеркало–покрытие.

Полированная поверхность меди представляет собой дефектный слой материала, образующийся в результате разрушения граней поликристаллов, который может содержать поры и полости. Как было ранее показано, предварительная очистка поверхности зеркала в тлеющем разряде инертного газа способствует вскрытию пор и может сопровождаться захватом инертного газа поверхностью меди [8]. Диффузия примесей и газов на границу раздела зеркало–покрытие должна вызывать локальное снижение адгезионного контакта. Этот процесс обуславливает ухудшение защитных свойств покрытия и может приводить к понижению порогов пробоя при хранении зеркал с покрытием  $a-C:H$  (рис. 8). Более низкие расчетные значения порогов разрушения покрытия при воздействии импульсного ИК излучения, полученные для случая нарушенного адгезионного контакта (рис. 4), подтверждают сделанное предположение.

С ростом толщины покрытия увеличивается вероятность процесса релаксации внутренних сжимающих напряжений, характерных для твердых покрытий  $a-C:H$ . Экспериментально было установлено, что при толщине покрытия  $0.35 \mu m$  действие внутренних сжимающих напряжений может приводить к самопроизвольному отслаиванию покрытия с поверхности медного зеркала при его нагреве до  $200^\circ C$  [8]. Локальное нарушение адгезионного и теплового контакта на границе зеркало–покрытие может происходить при тепловом и ударном воздействии лазерного излучения. Принимая это во внимание, понижение пороговых значений плотности мощности излучения на экспериментальной зависимости  $q(d)$  (рис. 4) при  $d > 0.2 \mu m$  можно объяснить ухудшением адгезионного контакта в результате действия внутренних сжимающих напряжений, возрастающих с увеличением толщины покрытия. При значительной толщине защитного покрытия  $d \geq 0.7 \mu m$  экспериментальные значения порога пробоя приближаются к расчетным для случая нарушенного адгезионного и теплового контакта.

Характер разрушений покрытия  $a-C:H$  свидетельствует о том, что температура в пятне облучения превышает максимальную расчетную температуру ( $200^\circ C$ ), полученную для случая идеального адгезионного контакта. Термохромные изменения покрытия, наблюдаемые в результате оптического пробоя, свидетельствуют о нагреве поверхности в пятне до  $420^\circ C$ . Полное разрушение покрытия  $a-C:H$  может происходить при  $1000^\circ C$ , минуя стадию плавления. Нагрев до такой температуры возможен в результате взаимодействия покрытия с плазмой, образующейся при оптическом пробое. Размер разрушения покрытия толщиной  $0.1-0.2 \mu m$  в результате приповерхностного оптического пробоя увеличивается с повышением плотности мощности излучения, но при этом не превышает площади пятна облучения (рис. 6). Вместе с тем наблюдаемое увеличение размера разрушения со временем можно объяснить снижением адгезионного и теплового контакта покрытия.

Повышение порога пробоя зеркал с покрытием  $a-C:H$  при снижении скорости осаждения последнего на рис. 5 свидетельствует о влиянии свойств  $a-C:H$  на процесс плазмообразования у поверхности зеркал с покрытием при оптическом пробое. Кинетика процесса конденсации  $a-C:H$  оказывает существенное влияние на средний порядок структуры, определяемый размерами  $\pi$ -связанных кластеров [16].  $\pi$ -кластеры состоят из полициклических ароматических групп, полиеновых и полииновых цепей с единой системой сопряжения кратных связей [17]. Понижение скорости сопряжения покрытий  $a-C:H$ , полученных из ацетилена, способствует росту размеров таких кластеров, снижению содержания связанного водорода и уменьшению ширины оптической щели [18]. Одновременно с этим растет оптическое поглощение в видимой области спектра и показатель преломления [16]. Покрытия  $a-C:H$  с бесструктурным электронным спектром (рис. 7, кривая 2), полученные при скоростях менее  $2 \text{ \AA/s}$ , имели наиболее высокие пороги оптического

пробоя. Такие покрытия отличаются низким удельным сопротивлением  $10^7 - 10^8 \Omega \cdot \text{см}$  от покрытий со структурированным электронным спектром (рис. 7, кривая 1), у которых оно равно  $10^{11} - 10^{12} \Omega \cdot \text{см}$ . Поэтому можно сделать вывод, что электронная структура  $a-C:H$  играет существенную роль в процессе плазмообразования у поверхности зеркала при оптическом пробое.

Поглощения кванта с энергией 0.1 eV при воздействии ИК излучения на покрытие  $a-C:H$  достаточно для зарождения носителей заряда внутри области сопряжения  $\pi$ -электронов, т.е. на отдельном  $\pi$ -кластере. В покрытии  $a-C:H$ , электронный спектр которого имеет максимумы с энергией выше оптической ширины щели, возможно образование экситона. Дальнейшее движение последнего зависит от степени локализации  $\pi$ -электронов и для аморфной структуры должно иметь прыжковый характер. Рассеяние энергии на оптических фононах должно вызывать нагрев защитного покрытия  $a-C:H$  под действием ИК излучения и термоэмиссию электронов. Чем выше проводимость покрытия, тем меньше вероятность нагрева его за время действия лазерного импульса и выше порог оптического пробоя.

Нельзя исключать возможность локального нагрева покрытия, связанного с поглощением излучения с длиной волны  $10.6 \mu\text{м}$  дефектами и инородными включениями на границе зеркало–покрытие. Чем хуже адгезионный и тепловой контакт на границе металл–покрытие, тем больше вероятность его нагрева до температур термодеструкции и оптического пробоя в парах вещества в результате поглощения ИК излучения. Тепловую модель приповерхностного оптического пробоя считают наиболее хорошо обоснованной [1]. Она представляет собой поэтапное развитие пробоя: нагрев и испарение вещества преграды, лавинообразное поглощение в парах вещества, формирование плазменного очага с переходом в воздушную плазму. Согласно тепловому механизму, оптический пробой вблизи поверхности зеркала с покрытием  $a-C:H$  может развиваться в результате локального нагрева в отдельных участках зоны лазерного облучения до температуры выше  $450^\circ\text{C}$ , термодеструкции покрытия и окисления углеводородных продуктов разложения. Такой механизм наиболее вероятен для металлического зеркала с покрытием в случае  $0 < r < \infty$ . Вместе с тем нельзя исключать возможность трибо- и механоэмиссии электронов при образовании трещин в результате релаксации внутренних сжимающих напряжений в покрытие при  $r \rightarrow \infty$ .

## Заключение

Проведен систематический анализ влияния различных факторов на порог пробоя медных зеркал с защитным покрытием  $a-C:H$ . В результате проведенных исследований показано различие условий плазмообразования при воздействии интенсивного лазерного излучения на длине волны  $10.6 \mu\text{м}$  у поверхности металла и защит-

ного покрытия  $a-C:H$ . При толщине покрытия менее  $0.2 \mu\text{м}$  порог приповерхностного оптического пробоя зеркал определяется свойствами  $a-C:H$ . Повышение порога пробоя зеркала после осаждения на его поверхность покрытия  $a-C:H$  достигается благодаря блокирующему эффекту, обусловленному механической прочностью и химической стойкостью аморфного покрытия, а также его оптическим и электрическим свойствами. Более высокие пороги пробоя наблюдались на покрытиях  $a-C:H$ , полученных при скоростях осаждения ниже  $2 \text{ \AA/s}$ , отличающихся бесструктурным электронным спектром с глубиной уровней ловушек, не превышающей  $\sim 1.5 \text{ eV}$ , и удельным сопротивлением  $10^7 - 10^8 \Omega \cdot \text{см}$ . При толщине защитных покрытий  $a-C:H$  более  $0.2 \mu\text{м}$  порог пробоя зеркал определяется условиями на границе раздела металл– $a-C:H$ . Уменьшение силы сцепления между ними в результате релаксации сжимающих напряжений в покрытии приводит к понижению порога пробоя с увеличением толщины  $a-C:H$ . Локальное нарушение адгезионного контакта, обусловленное диффузией примесей и газов из приповерхностного слоя медного зеркала на границу раздела, приводит к росту теплового сопротивления и снижению порога оптического пробоя при хранении зеркал.

Полученные результаты будут способствовать пониманию влияния взаимодействия интенсивных световых потоков лазерного излучения с пассивными элементами  $\text{CO}_2$  лазеров, защищенными покрытиями  $a-C:H$ , на их работу.

Автор приносит свою благодарность Е.М. Юдинцеву за проведение испытаний порога оптического пробоя зеркал и Т.А. Жевлаковой за измерения их коэффициентов отражения, а также Н.А. Новоселову за техническую помощь в работе.

## Список литературы

- [1] Бонч-Бруевич А.М., Диденко И.А., Капорский Л.Н. Низкопороговый оптический пробой газов вблизи поверхности (Обзор экспериментальных и теоретических работ). Минск: АН БССР, 1985. С. 60.
- [2] Балаков А.В., Коншина Е.А., Песков О.Г., Шорохов О.А. // Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Оптика лазеров". Л., 1981. С. 365.
- [3] Балаков А.В., Коншина Е.А., Юдинцев Е.М. // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Оптика лазеров". Л., 1983. С. 337.
- [4] Балаков А.В., Коншина Е.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 810–811.
- [5] Захаров А.С., Зеленов А.А., Семенов Е.П., Юдинцев Е.М. // ОМП. 1977. № 6. С. 29–31.
- [6] Коншина Е.А., Баранов А.В. // Поверхность. 1989. № 4. С. 53–58.
- [7] Семенович В.А., Шегурский Л.А., Огородник Б.В., Пугач Э.А. // Сверхтвердые материалы. 1984. № 6. С. 17–18.
- [8] Балаков А.В., Коншина Е.А., Калугина Т.И. // ОМП. 1986. № 12. С. 37–38.

- [9] Карпман И.М., Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б. Лазерная термолитография в производстве интегральных схем. Л., 1981. С. 4–12.
- [10] Яковлев В.Б., Васильева Л.К., Веремей В.В., Коншина Е.А. // ЖПС. 1990. Т. 53. № 5. С. 863–865.
- [11] Реди Дж.Ф. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. С. 89–92.
- [12] Бонч-Бруевич А.М., Либенсон М.И. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 6. С. 1104–1118.
- [13] Физика тонких пленок. М.: Мир, 1967. Т. 2. С. 294.
- [14] Конов В.И., Прохоров А.М., Чаплиев Н.И. // Изв. АН СССР. 1984. Т. 48. № 8. С. 1591–1599.
- [15] Tolmachev V.A., Konshina E.A. // Diamond & Related Materials. 1996. Vol. 5. N 12. P. 1397–1401.
- [16] Коншина Е.А., Толмачев В.А. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 1. С. 175–178.
- [17] Баранов А.В., Коншина Е.А. // Опт. и спектр. 1988. Т. 65. Вып. 4. С. 856–860.
- [18] Коншина Е.А. // ФТТ. 1995. Т. 37. Вып. 4. С. 1120–1125.