

05

© 1992 г.

**ИНДУЦИРОВАННОЕ ЛАЗЕРОМ МИКРОРАЗРУШЕНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ВНЕ ОБЛУЧАЕМОЙ ЗОНЫ***А. М. Кондырев, И. П. Щербаков, К. Б. Абрамова, А. Е. Чмель*

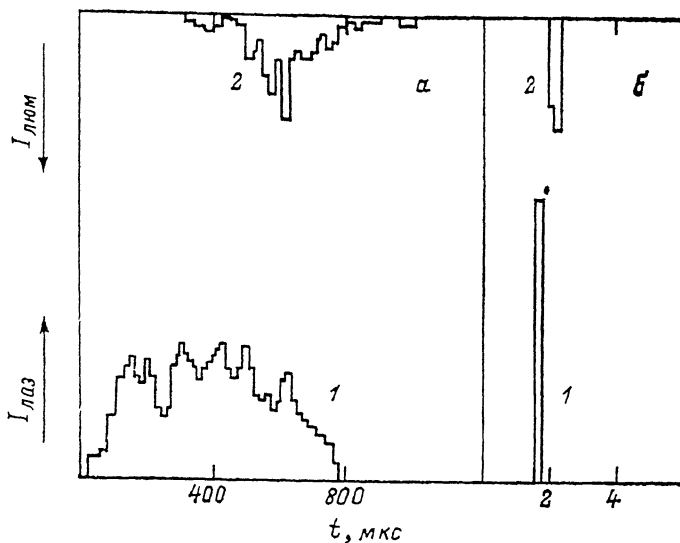
Металлические лазерные зеркала, как правило, используются в режиме многократного допорогового облучения, т. е. испытывают действие последовательности импульсов, каждый из которых в отдельности безопасен для мишени [1]. Однако микроскопические изменения, происходящие в процессе длительной эксплуатации зеркала (углубление рельефа, повышение поглощения и др.), приводят к постепенному падению отражательной способности и в конечном счете к катастрофическому разрушению поверхности зеркала вследствие загорания плазменного факела. Принято считать [1, 2], что причиной допороговой деградации металла является возникновение термоупругих напряжений вокруг фокального пятна. Металл как бы подвергается действию циклической механической нагрузки и разрушается в результате развития усталостных процессов, хорошо известных в материаловедении. В то же время мало изучено влияние облучения на периферические части мишени, не испытывающие непосредственного действия излучения — объемные области, поверхности боковых и обратной сторон зеркала, хотя очевидно, что распространение термоупругих волн из облучаемого пятна затрагивает периферические зоны.

Наблюдения за необлучаемыми областями могут быть полезны для изучения механизма допороговой деградации металлов в условиях, когда исключены факторы, характерные для зоны непосредственного действия оптического излучения: неравномерность поглощения и рассеяния света, микроскопические плазменные вспышки и т. д. Кроме того, они, по-видимому, смогут послужить основой для разработки методов контроля облученных областей в тех случаях, когда облучаемые области недоступны или неудобны для наблюдения.

В настоящей работе обнаружены признаки разрушения обратной поверхности металлической пластины, испытывающей действие импульсов лазера с длиной волны 1.06 мкм.

В опытах использовали развитую в работах [3, 4] методику обнаружения поверхностных микроповреждений с помощью регистрации люминесценции. В нашем случае образец в виде медной пластины толщиной ~ 1 мм помещался перед входным окном ФЭУ-136. Фотоумножитель, чувствительный к излучению в широкой спектральной области 300—830 нм, использовался в аналоговом режиме в комплексе с цифровым запоминающим осциллографом С9-8. Источником оптического излучения служили лазеры на неодимовом стекле со следующими параметрами: I — длительность импульса $t_p = 0.8$ мс, энергия в режиме свободной генерации $P = 150$ Дж, пучок фокусировался в пятно диаметром $d_{эф} = 2-6$ мм; II — $t_p = 60$ нс, $P = 0.07$ Дж, $d_{эф} = 0.5$ мм.

Для решения поставленной задачи большая мощность лазеров была не нужна, поэтому световой пучок ослаблялся нейтральными светофильтрами до уровня $P_{пор}$, соответствующего порогу загорания плазменного факела на передней поверхности образца, и еще ниже; нижний предел мощности лазерного импульса определялся возможностью регистрации люминесценции тыльной поверхности образца и был равен 0.1—0.2 $P_{пор}$.



Импульсы лазерного излучения (1) и соответствующие отклики люминесценции (2).
Гистограммы получены с помощью цифрового осциллографа.

При облучении образца первым лазером было обнаружено, что при $P^I > 0.1 - 0.2 P_{\text{пор}}^I$ через $0.2 - 0.5$ мс после начала лазерного импульса возникает сигнал люминесценции ($I_{\text{лном}}$) в виде отдельных вспышек (см. рисунок, а). По мере увеличения мощности лазера интенсивность излучения возрастает. В работе [4] аналогичный эффект, т. е. свечение обращенной к ФЭУ поверхности медного образца, наблюдалось при деформации металла вследствие возникновения термоупругих напряжений.

При уменьшении длительности импульса до 60 нс, т. е. при использовании источника II, энергия, соответствующая порогу плазменного пробоя, заметно упала ($P_{\text{пор}}^{\text{II}} \approx 0.2 P_{\text{пор}}^I$), а пороговая плотность мощности из-за уменьшения длительности импульса возросла приблизительно на 2 порядка величины. При использовании источника II не наблюдалось свечение через доли миллисекунды после лазерного импульса, но обнаружена вспышка люминесценции задержанная относительно лазерного импульса на $0.2 - 0.3$ мкс (см. рисунок, б).

Как показывают оценки [5, 6], в первом случае на тыльной стороне появляется участок с температурой, превышающей комнатную примерно на несколько десятков градусов, во втором случае повышение менее одного градуса. Эти различия позволяют предположить, что микроразрушения, следствием которых является механолюминесценция, вызываются в первом и втором случаях разными причинами.

Исходя из длительностей временных интервалов, отделяющих импульс люминесценции от лазерного импульса при использовании источников I и II, можно полагать, что при действии первого источника ($\tau_I = 0.8$ мс) импульс люминесценции связан с действием термоупругих напряжений, возникающих в облученной зоне; напряжения распространяются в этом случае со скоростью фронта тепловой волны и достигают обратной стороны образца за время, определяемое коэффициентом теплопроводности металла и его теплоемкости (в случае медной пластины толщиной 1 мм $\Delta t_{\text{зап I}} = 250$ мкс, что хорошо совпадает с экспериментальным значением запаздывания), а при действии второго источника ($\tau_{\text{II}} = 60$ нс) — с действием акустических волн. Источник II, имеющий высокую плотность энергии, генерирует интенсивные акустические волны, распространяющиеся со скоростью звука. Время прохождения упругой волны через наш образец составляет $\Delta t_{\text{II}} = d/v = 0.3$ мкс (для меди $v = 3.6 \cdot 10^5$ см/с), что также соответ-

ствует измеренному значению (см. рисунок, б). Таким образом, оба сигнала свечения, регистрируемые с задержкой 250 и 0.3 мкс, обязаны происхождением механическим напряжениям, но причина возникновения последних различна. Сначала приходит акустическая волна, а затем обратной поверхности пластины достигает тепловой фронт. Параметры импульсов источников I и II позволяют при применении каждого из них видеть лишь одну из вспышек люминесценции. Лишь при облучении источником I при $P^I > P_{\text{пор}}^I$ удавалось наблюдать два разделенных во времени импульса люминесценции, т. е. помимо импульса люминесценции, вызванного термоупругими напряжениями, появляется импульс люминесценции, связанный с действием акустических волн, как в случае облучения образца источником II. По-видимому, это вызвано тем, что при переходе через порог зажигания плазмы резко возрастает амплитуда акустической волны (I_a): при $P \geq P_{\text{пор}}$ $I_a \sim P^4$, тогда как при $P < P_{\text{пор}}$ $I_a \sim P^2$ [7, 8].

Известно [6], что амплитуда I_a даже при $P > P_{\text{пор}}$ существенно ниже величины критической деформации, ведущей к разрушению металла. Однако образование микродефектов (о чем, согласно [4], свидетельствует люминесценция необлучаемой поверхности образца) в этом случае возможно в процессе нелинейного взаимодействия упругих волн с неоднородностями металла. В работе [9] предложен новый механизм образования необратимых дефектов вследствие взаимодействия слабых ("докритических") упругих волн с тепловыми флуктуациями плотности в твердом теле, рассматриваемыми как собственные неоднородности вещества. В основе механизма лежит теория параметрического резонанса между акустическими колебаниями кристаллической решетки и собственными колебаниями неоднородности [10]. Возбуждаемым параметром при резонансе является модуль упругости, а роль константы связи играет коэффициент Грюназейна. Численная оценка показывает [9], что амплитуда акустических волн, генерируемых при воздействии на металл лазерного импульса пороговой мощности и длительностью $\sim 10^2$ нс, достаточна для образования дефекта размером $\sim 10^{-5}$ см за счет параметрической накачки тепловой флуктуации плотности. Результаты опытов по регистрации индуцированной лазером II механолюминесценции, на наш взгляд, могут быть объяснены в рамках указанного механизма образования микротрещин [9]. При использовании лазера I возникновение и эволюция системы зародышевых дефектов и микротрещин скорее связаны с дислокационными процессами, явлениями температурной перекристаллизации и др.

Работа по дальнейшему изучению явления свечения необлучаемых зон металлической мишени продолжается в направлении определения спектра свечения и кинетики свечения при многократном облучении, а также установления корреляции параметров люминесценции с дефектностью материала.

Список литературы

- [1] Прохоров А. М., Конов В. И., Урсу И., Михалеску И. П. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, 1988. 538 с.
- [2] Lee C.S., Koumyvakalis N., Bass M. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. N 10. P. 5727—5731.
- [3] Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Златин Н. А. и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 5. С. 1873—1879.
- [4] Абрамова К. Б., Перегуд Б. П., Щербатов И. П. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 8. С. 80—85.
- [5] Rosencwaig A., Willis J. B. // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. N 8. P. 667—671.
- [6] Scruby C. B., Dewhurst R. J., Hutchins D. A., Palmer S. B. // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 12. P. 6210—6216.
- [7] Ready J. F. // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. N 2. P. 462—468.
- [8] Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М., 1963. 251 с.
- [9] Kusov F. F., Kondyrev A., Chmel A. // J. Phys. 1990. Vol. 2. N 18. P. 4227—4233.
- [10] Кусов А. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 5. С. 1574—1577.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
16 августа 1990 г.
В окончательной редакции
14 марта 1991 г.