УДК 533.9; 621.793.6

А.Р. ФАДАИЯН (ИРАН), А.П. ЗАЖОГИН

ЭФФЕКТЫ НИЗКОПОРОГОВОГО ПРОБОЯ МЕТАЛЛОВ ОДИНОЧНЫМИ И СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

The paper presents a study into the breakdown of a flat D16T aluminum alloy sample under the target effect of double laser pulses. With the use of double laser pulses having a time interval between the pulses about $1\div11 \mu$ s, a breakdown time for the D16T duralumin sample 1-mm thick has revealed a considerable reduction (by one or two orders of magnitude) as compared to the zero interval. A maximum breakdown rate has been observed for the energies corresponding to a threshold of the transition between evaporative and explosive mechanisms of the substance ingress. The obtained results have been considered.

Роль образующей приповерхностной лазерной плазмы при импульсной лазерной абляции металлов является определяющей с точки зрения достижения эффективности их обработки [1, 2]. Плазменная экранировка в этом случае выступает, с одной стороны, фактором, ограничивающим применение больших плотностей мощности, а с другой – может и ускорять процессы абляции металлов. Несмотря на обилие полученных экспериментальных результатов, остаются еще и недостаточно разработанные вопросы, в том числе и о влиянии временных интервалов между сдвоенными лазерными импульсами на эффективность пробоя отверстий в твердом теле.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Источником возбуждения плазмы в нем являлся двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемыми энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (от 10 до 80 мДж), так и временного интервала между импульсами (0÷100 мкс с шагом 1 мкс). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц и максимальной энергией излучения каждого из сдвоенных импульсов до 80 мДж на длине волны λ = 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм; размер пятна фокусировки около 50 мкм. Свечение плазмы собиралось с помощью аналогич-ного конденсора на переднюю поверхность двух кварцевых волокон диаметром 200 мкм и направля-лось на входную щель двух спектрометров типа SDH-1. Спектр регистрировался с помощью ПЗС-линейки TCD 1304 AP (3648 пикселей). Запуск системы роводились в атмосфере воздуха при нор-мальном атмосферном давлении.

Зависимость энергии импульсов излучения от энергии накачки и задержки приведена в таблице. Коэффициент использования излучения ~ 0,6.

| Задержка, мкс | Энергия накачки, Дж | | | | | | | |
|---------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 100 | 17 | 28,5 | 39,5 | 50 | 60,5 | 71,5 | 84 | 95,5 |
| 110 | 22 | 32,5 | 44,5 | 57,5 | 69 | 80,5 | 93 | 104 |
| 120 | 26,5 | 38 | 51 | 64 | 75 | 86 | 97,5 | 110 |
| 130 | 30 | 42 | 54,5 | 66,5 | 78,5 | 89 | 100 | 111 |
| 140 | 32 | 44 | 56,5 | 68 | 79,5 | 90 | 102 | 111 |
| 150 | 34 | 45,5 | 59 | 71 | 81,5 | 92 | 102 | 110 |
| 160 | 34,5 | 46,5 | 57,5 | 68 | 78 | 88,5 | 99 | 109 |
| 170 | 33 | 45,5 | 57 | 67,5 | 77,5 | 87,5 | 92 | 106 |

Зависимость энергии импульсов излучения (в мДж) от энергии накачки и задержки

Динамика развития пробоя отверстий исследовалась методом многоканальной атомноэмиссионной спектрометрии при воздействии серий из 250 сдвоенных лазерных импульсов на точку на пластинке алюминиевого сплава типа Д16Т толщиной 1 мм от энергии (20÷50 мДж) и временного интервала между сдвоенными импульсами в атмосфере воздуха. В качестве примера на рис. 1 приведена характерная зависимость пропускания образца дюралюминия Д16Т от числа сдвоенных лазерных импульсов при различных временных задержках между ними (1÷11 мкс) и плотности мощности одного канала $\approx 10^9 \div 5 \cdot 10^9$ Вт·см⁻². На образование сквозного канала указывает начало резкого падения интенсивности наиболее сильной линии алюминия с λ = 396,15 нм в последовательных спектрах испускания плазмы. Следует обратить внимание на



Рис. 1. Зависимость интенсивности линии алюминия λ=396,15 нм от количества импульсов абляции в точку для различных времен задержки между первым и вторым импульсом

то, что через некоторое число импульсов интенсивность линии немного возрастает, что свидетельствует о начале испарения стенок канала с переносом вещества к его центру.

Количество импульсов, соответствующих пробою отверстия, позволяет определить среднюю линейную скорость абляции для образца данной толщины (1 мм). Средние линейные скорости абляции для задержек в интервале 0÷11 мкс представлены на рис. 2. Следует отметить, что при нулевой задержке между импульсами необходимое их количество для пробоя образцов превышает несколько тысяч, что хорошо коррелирует с результатами работы [3].

Наличие резкого временного порога скорости абляции указывает на то, что причину наблюдаемых явлений необходимо искать в особенностях плазмообразования внутри образующегося достаточно глубокого канала. Картина плазмообразования в воздушной среде существенно усложняется из-за последействия, практически неизбежного при формировании глубоких отверстий сдвоенными импульсами, что вызывается накоплением аблиро- *h*, мкм/имп.

ванных микрочастиц и кластеров в атмосфере образующихся полостей. При этом воздействие импульса, следующего через небольшой интервал времени, приводит к низкопороговому оптическому пробою воздуха, насыщенного микрочастицами металла, и появлению одновременно двух разнесенных в пространстве плазменных образований. Одним из них является обычный факел лазерной плазмы на аблируемой поверхности и на дне формируемого отверстия, а другим – плазменно-пылевое облако, также возникающее на оси лазерного пучка, но отстоящее от поверхности на определенное расстояние. В этом случае появление плазменно-пылевой области приводит,



образца дюралюминия Д16Т от времени задержки между первым и вторым импульсом

с одной стороны, к дополнительной экранировке, а с другой, по-видимому, более важной – к созданию высокотемпературного плазменного облака высокого давления, разлетающегося преимущественно по направлению к отверстию. Последний эффект и обусловливает увеличение скорости пробивки по сравнению с одиночными или редко повторяющимися импульсами. Так, к примеру, в исследованиях [3, 4] скорость пробивки менее 1 мкм/имп. при сравнимых плотностях мощности одиночного импульса в режиме редко повторяющихся импульсов, что примерно на порядок меньше (≈10 мкм/имп.) для высокой частоты повторения (10÷200 кГц).

Подтверждением указанного механизма может служить и тот факт, что при увеличении задержки между импульсами скорость пробивки отверстия уменьшается. Результаты этих экспериментов позволяют полуколичественно определить среднее время существования и средний размер микрочастиц металла, образующихся в воздушной среде канала. Произведем оценку параметров газовой среды в аблируемом канале, рассмотрев несколько фаз процесса, включающих: разлет аблированных и сконденсировавшихся частиц после первого импульса, взаимодействие второго импульса с указанными продуктами, разлет плазменного факела за время лазерного воздействия, дальнейшее расширение плазменной области за счет разницы давлений внутри и снаружи ее и последующее остывание нагретого газа вблизи аблированной поверхности. Для типичных, используемых в эксперименте значений интенсивности лазерных импульсов $q \approx 5 \cdot 10^9$ Вт/см² скорость разлета и температура плазмы во второй фазе достигают значений $3 \cdot 10^6$ см/с и $3 \cdot 10^5$ К соответственно [3–5]. С учетом скорости и продолжительности импульса облучения к концу этой фазы протяженность плазменного факела при одномерном расширении могла бы составить 0,45 мм, что сравнимо с длиной канала. В результате за время прохождения второго лазерного импульса плазма достигает поверхности образца. После окончания действия лазерного импульса плазменная область продолжает расширяться за счет запасенной в ней энергии и давления. Расширение прекращается, когда давление внутри ее достигает атмосферного. Образуется резко ограниченная и относительно долгоживущая область горячего газа вблизи облученной поверхности.

Время формирования $t \approx 2$ мкс и максимальный радиус $r \approx 0,6$ мм горячей области, определенные в [3], неплохо коррелируют с наблюдаемым в нашем случае резким изменением скорости пробоя отверстия при времени задержки между импульсами примерно 4 мкс.

На основании проведенных экспериментальных исследований можно заключить, что необходимыми условиями проявления как газодинамического, так и плазмообразующего механизмов, приводящих к изменению скорости пробивки и плотности эрозионной плазмы, являются: во-первых, ограничение бокового разлета плазмы стенками формируемого канала и, во-вторых, увеличение вероятности низкопорогового оптического пробоя воздуха, насыщенного микрочастицами металла, вторым импульсом, следующим с небольшой задержкой после первого. С ростом задержки второго импульса следует ожидать снижение его роли в скорости пробивки отверстия, поскольку взаимодействие этого импульса с плазменно-пылевым облаком будет происходить уже за пределами канала.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ (грант Ф07-206).

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М., 1989.

2. Реди Дж. Промышленное применение лазеров. М., 1981.

3. Климентов С.М., Гарнов С.В., Конов В.И., Кононенко Т.В. и др. // Тр. ИОФ им. А.М. Прохорова РАН. 2004. Т. 60. С. 13.

4. Гарнов С.В., Климентов С.М., Конов В.И. и др. // Квант. электроника. 1998. Т. 25. № 1. С. 45.

5. Буфетов И.А., Кравцов С.Б., Федоров В.Б. // Там же. 1996. Т. 23. № 5. С. 535.

Поступила в редакцию 24.09.08.

Фадаиян Ахмад Реза – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии. Научный руководитель – А.П. Зажогин. Анатолий Павлович Зажогин – доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии.