

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖДУИМПУЛЬСНОГО ИНТЕРВАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПРОБИВКИ МЕТАЛЛОВ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

А.Р. Фадаиян, Лэ Тхи Ким Ань, А.П. Зажогин
 Белорусский государственный университет,
 пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь, тел. 2095556, e-mail: zajogin_an@mail.ru

Для установления условий оптимального влияния дополнительного лазерного импульса на эффективность пробивки металлов проведены исследования пробивки алюминиевых пластинок методом лазерной искровой спектрометрии (лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1). Установлено, что максимальная средняя скорость пробивки достигается при интервале между сдвоенными импульсами равном 1-2 мкс. Для более детального изучения влияния интервала между импульсами на процессы пробивки нами исследованы спектры для различных энергий накачки и интервалов между импульсами. Выяснено, что при малых интервалах атомные линии в спектрах сильно искажены из-за реабсорбции при прохождении излучения через оптически плотные слои приповерхностной лазерной плазмы. Для оценки значений оптической плотности плазмы использованы отношения для пары резонансных атомных линий алюминия 396,152 и 394,400 нм. Полученные результаты по зависимости оптической плотности плазмы от интервала между импульсами хорошо коррелируют с результатами по средней скорости пробивки.

Введение

Лазерная абляция твердых тел наносекундными импульсами умеренной интенсивности используется во многих научных и практических приложениях. Роль образующей приповерхностной лазерной плазмы при импульсной лазерной абляции металлов является определяющей с точки зрения достижения эффективности их обработки [1, 2]. Плазменная экранировка при импульсной лазерной абляции является, с одной стороны, фактором, ограничивающим применение больших плотностей мощности, а с другой стороны, в ряде случаев может и ускорять процессы абляции металлов. Несмотря на обилие полученных экспериментальных результатов, есть еще и недостаточно освещенные вопросы. Одним из них является вопрос, как влияет временной интервал между сдвоенными лазерными импульсами на эффективность пробоя отверстий в твердом теле.

В большинстве исследований двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии (ЛАЭС) используется коллинеарная, или коаксиальная, конфигурация совмещения, когда первый и второй лазерные импульсы фокусируются в одном и том же положении на поверхности образца. Такая конфигурация наиболее распространена, поскольку она наиболее пригодна для ориентации лазерных импульсов при проведении анализа на месте и в оперативном режиме [3]. Первый импульс обеспечивает лазерную искровую плазму (ЛИП), которая фактически эквивалентна искре при моноимпульсной ЛАЭС со сравнимым абляционным факелом, составом, температурой, сравнимой плотностью электронов и скоростью затухания. Второй импульс, который обычно следует после некоторого времени задержки t_d (вплоть до 100 мкс), вызывает абляцию дополнительного материала и порождает двухимпульсную ЛИП с совершенно иными физическими свойствами.

Так как быстро нагревающийся твердотельный, жидкий или газообразный образец около фокального объема расширяется со скоростью, в несколько раз превышающей скорость звука, он

выталкивает вперед окружающую атмосферу. До того, как плазма остынет, и диффузия окружающей атмосферы сможет диффундировать в объем, находящийся под воздействием ударной волны, этот почти мгновенный нагрев и расширение предположительно оставляют за собой область с весьма повышенной температурой, несколько повышенным давлением и сильно сниженной плотностью атмосферного окружения.

Основная часть

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. В качестве источника абляции и возбуждения приповерхностной плазмы спектрометр включает в себя двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (до 80 мДж), так и временного сдвига между сдвоенными импульсами (0-100 мкс) излучения.

Динамика развития пробоя отверстий исследовалась методом многоканальной атомно-эмиссионной спектрометрии при воздействии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав типа Д16Т от энергии (20-50 мДж) и временного интервала между сдвоенными импульсами в атмосфере воздуха. Размер точки фокусировки ≈ 50 мкм при фокусном расстоянии ахроматического объектива 100 мм.

Динамика пробоя исследована по поступлению вещества в плазму при воздействии серий из 250 сдвоенных лазерных импульсов на точку. На образование сквозного канала указывает начало резкого падения интенсивности линии алюминия 396,15 нм в последовательных спектрах испускания плазмы. Количество импульсов, соответствующих пробоя отверстия, позволяет определить среднюю линейную скорость абляции для образца данной толщины (1 мм). Средние линейные скорости абляции для задержек в интервале 0-11 мкс и энергии импульсов 60 мДж (энергия накачки 16 Дж) представлены на рис. 1. Следует отметить, что при нулевой задержке между импульсов

необходимое количество импульсов для пробоя образцов превышает несколько тысяч, что хорошо коррелирует с результатами работы [3].

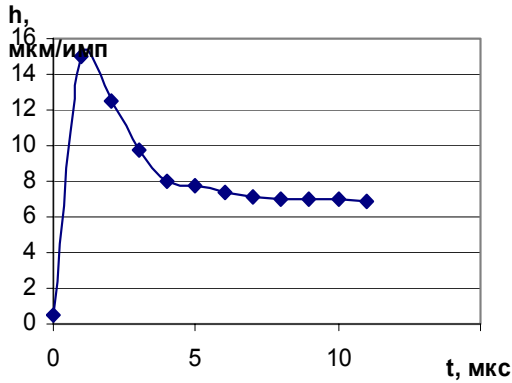


Рис. 1. Зависимость средней линейной скорости абляции образца дюралюминия D16T от времени задержки между первым и вторым импульсом

Для более детального изучения влияния интервала между импульсами на процессы пробивки нами исследованы спектры для различных энергий накачки и интервалов между импульсами. Выяснено, что при малых интервалах атомные линии в спектрах сильно искажены из-за реабсорбции при прохождении излучения через оптически плотные слои приповерхностной лазерной плазмы. Для оценки значений оптической плотности плазмы нами использованы теоретические результаты и график из работы [6, рис. 9], для пары резонансных атомных линий алюминия 396,152 и 394,400 нм. Результаты обработки спектров представлены на рис. 2.

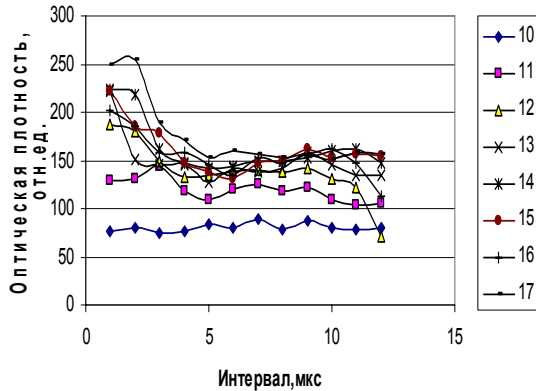


Рис. 2. Зависимость оптической плотности плазмы алюминия от интервала времени между двояными импульсами и различных энергий накачки.

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 явления последействия, практически неизбежного при формировании глубоких отверстий двояными импульсами, что вызывается накоплением аблированных микрочастиц и кластеров в атмосфере образующихся полостей. При

этом воздействие последующего импульса, следующего через небольшой интервал времени, приводит к низкороговому оптическому пробоя 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 затем 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, отстоящей на определенном расстоянии от поверхности, приводит, с одной стороны, к дополнительной экранировке, а с другой, по-видимому, более важной, к созданию высокотемпературного плазменного облака высокого давления, разлетающегося преимущественно по направлению отверстия. Последний эффект и обуславливает увеличение оптической плотности плазмы и увеличение скорости пробивки по сравнению с одиночными или редко повторяющимися импульсами. Так, к примеру, в работах [3, 4] скорость пробивки менее 1 мкм/импульс при сравнимых плотностях мощности одиночного импульса в режиме редко повторяющихся импульсов, что примерно на порядок меньше (≈ 10 мкм/импульс) 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 в канале.

Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований можно заключить, что необходимыми условиями для проявления как газодинамического, так и плазмообразующего механизмов, приводящих к изменению скорости пробивки и плотности эрозионной плазмы, являются, во-первых, ограничения бокового разлета плазмы стенками формируемого канала, и, во-вторых, увеличение вероятности низкорогового 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 его с плазменно-пылевым облаком будет происходить уже за пределами канала.

Список литературы

1. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989. - 302 с.
2. Реди Дж. Промышленное применение лазеров. - М.: Мир, 1981. - 638 с.
3. Климентов С.М., Гарнов С.В., Конов В.И., Кононенко Т.В. и др. // Труды ИОФ им. А.М. Прохорова РАН. - 2004. - Т.60. - С.13.

4. Гарнов С.В., Климентов С.М., Конов В.И., Кононенко Т.В., Даусингер Ф. // Квантовая электроника. – 1998. - Т. 25. - 1. – С. 45.
5. Буфетов И.А., Кравцов С.Б., Федоров В.Б. // Квантовая электроника. – 1996. - Т. 23. - 5. – С. 535.

6. Рязанов М.С. // Магистерская диссертация. Санкт-Петербург. - 2004. - 43 с.