

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ ЛАЗЕРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ФАКЕЛОВ МЕТАЛЛОВ

В.К. ГОНЧАРОВ, В.Л. КОНЦЕВОЙ, М.В. ПУЗЫРЕВ

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко,  
Беларусь, Минск, ул. Курчатова, 7

При воздействии лазерного излучения умеренной интенсивности ( $10^5$ - $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) на металлы, продукты эрозии состоят из паров, плазмы и мелкодисперсной жидкокапельной фазы материала мишени, формирующейся за счет механизма объемного парообразования.

Известны различные факторы, которые могут способствовать появлению объемного парообразования: пространственно-временная неоднородность лазерного излучения, растворенные в металле газы, различные примеси и структурные неоднородности. Представляет интерес выявить степень влияния каждого из этих факторов.

В качестве воздействующего излучения использовалось излучение неодимового лазера в различных режимах. Основным методом исследования был метод поперечного зондирования продуктов лазерной эрозии излучением вспомогательного рубинового лазера. В эксперименте одновременно контролировались коэффициенты рассеяния и поглощения зондирующего излучения. Сравнивая отношение поглощенной компоненты зондирующего излучения к рассеянной компоненте, полученное экспериментально, с таким же отношением, рассчитанным по теории Лява-Ми, можно определить диаметры частиц жидкокапельной фазы и их концентрацию.

Съем и обработка информации при проведении экспериментов производилась с помощью автоматизированного многоканального регистратора и ЭВМ.

Для определения степени влияния различных факторов на объемное парообразование производилось воздействие на свинцовые мишени импульса неодимового лазера длительностью 400-450 мкс с различной степенью модуляции по амплитуде.

Мишени изготовлялись путем переплавки свинца: в одном случае в воздухе, в другом - в вакууме, добиваясь при этом существенного уменьшения содержания газов в свинце вакуумной переплавки.

Эксперименты со свинцовыми мишенями проводились при плотности мощности неодимового лазера  $6,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Диаметр освещаемого на мишени пятна составлял 0,9 см. В таких условиях эксперимента удается разделить в пространстве и во времени частицы жидкокапельной фазы, образующиеся из-за объемного парообразования и за счет гидродинамического механизма.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для реальных металлов формирование эрозионного факела с мелкодисперсной жидкокапельной фазой материала мишени за счет объемного парообразования облегчается, прежде всего, за счет газов, растворенных в металле, и пространственно-временной неоднородности лазерного излучения. Действие этих двух факторов соизмеримо. Следующим фактором является наличие в металле различных включений и искусственных центров. При отсутствии этих трех факторов процессу объемного парообразования способствуют структурные неоднородности. И, наконец, при отсутствии всех этих факторов образование жидкокапельной фазы хотя и затруднено, однако также реализуется при увеличении плотности мощности. Это может быть как из-за неустойчивости фронта испарения, так и за счет взрыва метастабильной жидкости.

Показано, что формирование мелкодисперсной жидкокапельной фазы материала мишени за счет объемного парообразования - явление всеобщее. Отличие у разных металлов наблюдается только количественное.

В описанных экспериментах контроль всех параметров осуществлялся на одном расстоянии от поверхности мишени (1,5 мм). Для выявления изменений параметров жидкокапельной фазы в процессе движения вдоль эрозионного факела было проведено зондирование на различных расстояниях вплоть до 0,1 мм от поверхности мишени при одинаковых условиях воздействия.

Экспериментально показано, что существуют такие условия воздействия, при которых концентрация частиц мелкодисперсной жидкокапельной фазы, поступающих в эрозионный факел с поверхности мишени за счет объемного парообразования, увеличивается при удалении от поверхности мишени. При этом диаметры частиц уменьшаются - происходит их дробление вследствие перегрева. С другой стороны, частицы в процессе движения доиспаряются, за счет чего уменьшаются как их размеры, так и концентрация. Вследствие конкуренции процессов дробления и испарения частиц на некотором расстоянии от поверхности мишени наблюдается максимум концентрации частиц. Расстояние, на котором это происходит, зависит от материала мишени и от плотности воздействующего излучения.

В связи с тем, что в экспериментах удалось приблизиться к поверхности мишени на расстояние 0,1 мм, появилась возможность провести исследования по началу появления в продуктах лазерной эрозии частиц жидкокапельной фазы, формирующихся за счет объемного парообразования. Для этого желательно иметь максимальную чувствительность измерительной аппаратуры при измерении концентрации частиц. В данном случае минимально регистрируемая концентрация была  $10^8 \text{ см}^{-3}$ .

Эксперименты показали, что для каждого металла существуют такие условия лазерного воздействия, когда через некоторое время после начала облучения продукты разрушения состоят из светящихся паров прозрачных для излучения. Через некоторое время после формирования из этих паров эрозионного факела в него начинают поступать мелкие жидкие капли материала мишени за счет объемного парообразования. В конце импульса в факел поступают более крупные частицы со значительно меньшей концентрацией за счет гидродинамического механизма. Плотность мощности воздействующего излучения неодимового лазера, при которой это происходит, является характерной для каждого металла.

Опираясь на проведенные эксперименты процесс формирования лазерного эрозионного факела, образующегося при воздействии на металлы лазерного излучения умеренной интенсивности, можно представить следующим образом. При малых плотностях мощности происходит только нагрев мишени. При увеличении плотности мощности происходит плавление металла в зоне облучения. При дальнейшем увеличении плотности мощности воздействующего излучения происходит испарение расплавленного металла и в это время начинается формирование эрозионного факела, который первоначально состоит из прозрачных паров и плазмы. При последующем увеличении плотности мощности воздействующего излучения появляется объемное парообразование, за счет которого в эрозионный факел начинает поступать мелкодисперсная жидкокапельная фаза, первоначально с существенной задержкой, а затем при увеличении интенсивности облучения задержка уменьшается и становится минимальной. Жидкие капли, сформированные за счет объемного парообразования, двигаясь навстречу лазерному лучу, поглощают и рассеивают последний. Вблизи поверхности мишени вследствие перегрева частицы дробятся и доиспаряются. Доиспаряясь они создают вокруг себя более плотную плазменную среду, чем при адиабатическом разлете прозрачных паров. Более плотная среда при достижении некоторой плотности мощности воздействующего излучения приводит к резкому, лавинообразному увеличению коэффициента поглощения в плазме и параметры плазмы (концентрация заряженных частиц и температура) резко возрастают. Таким образом происходит плазменная вспышка (плазменный пробой) в эрозионном лазерном факеле, инициируемая доиспаряющимися частицами жидкокапельной фазы материала мишени.

Таким образом, первоначально эрозионный факел практически прозрачен для излучения, затем, когда в эрозионном факеле формируется мелкодисперсная жидкокапельная фаза материала мишени, начинают наблюдаться заметные потери излучения в продуктах лазерной эрозии. Ответственным за эти потери является поглощение и рассеяние на жидких каплях. После "вспышки поглощения" основные потери излучения определяются механизмами поглощения в плазме.