

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ФАКЕЛОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В. К. Гончаров, К. В. Козадаев

Институт прикладных физических проблем

им. А. Н. Севченко БГУ, Минск

E-mail: kozadaeff@mail.ru

После окончания действия лазерного импульса эрозионный факел вследствие своего расширения начинает охлаждаться, что приводит к рекомбинации свободных носителей заряда в плазме и увеличению ее прозрачности, а впоследствии – к конденсации паров металла [1]. Теоретическое рассмотрение процессов конденсации при таких условиях относится к вопросам кинетики быстрых фазовых переходов первого рода – проблематика, недостаточно изученная в настоящее время. Типичные скорости охлаждения пара при разлете облака продуктов абляции в вакууме составляют $10^{10} - 10^{11}$ К/с – классическая физика фазовых переходов ранее не рассматривала настолько неравновесных условий конденсации [2]. Для теоретического описания таких процессов предложена теория динамической конденсации расширяющегося пара (теория Зельдовича-Райзера или ЗР-теория) [3]. В рамках этого приближения имеются некоторые сложности в описании характерных временных масштабов конденсационных процессов, однако ЗР-теория позволяет получить наглядное представление о физике процесса и размерах формирующихся кластеров в условиях вакуума [2]. Согласно ЗР-теории первоначальное расширение пара происходит вдоль адиабаты Пуассона, далее пар охлаждается и переходит в состояние насыщения (адиабата Пуассона пересекает адиабату насыщения, задаваемую уравнением Клайперона-Клаузиуса). С этого момента начинается процесс конденсации. При этом по паровому облаку (от периферии к центру) последовательно распространяются три волны: волна насыщения, волна «впрыскивания» критических зародышей (момент когда переохлаждение пара максимально) и волна «закалки» (т.е. окончательного формирования кластеров). Для типичных параметров облака продуктов лазерной абляции интервал времени от момента воздействия до окончания «закалки» составляет несколько микросекунд. В итоге появляется облако нанокластеров материала мишени с характерными размерами 5-10 нм [2]. Даже при отсутствии подгоночных параметров ЗР-теория позволяет получить хорошее согласие с экспериментом, однако дополнительный учет влияния атмосферы внешних газов и реальных профилей давления и плотности в паровом облаке сильно усложняет модель процессов, поэтому удовлетворительное приближение для лазерной эрозии металлов в атмосфере отсутствует [2].

Для экспериментального исследования динамики процессов, протекающих в металлических эрозионных факелах после окончания действующего лазерного импульса, в [4, 5] была применена методика поперечного лазерного зондирования с параллельным разделением экстинкции излучения в факеле на поглощенную и рассеянную составляющую.

Результаты экспериментов с точки зрения ЗР-теории могут быть интерпретированы следующим образом: на первом этапе формирования ЭЛФ происходит его взаимодействие с задним фронтом падающего излучения, за счет чего плазма факела значительно увеличивает свою плотность и температуру, что позволяет ей оставаться непрозрачной для зондирующего излучения на протяжении сотен наносекунд после воздействия. Далее начинается резкий спад оптической плотности факела, сопровождающийся появлением рассеянной компоненты. Этот момент может соответствовать прохождению на высоте зондирования волны насыщения пара. В остывшем паро-плазменном образовании формируются неоднородности плотности, которые и приводят к нарастанию рассеянной компоненты. Достижение рассеянной компонентой своего максимума говорит о появлении большого количества рассеивающих центров, что свидетельствует о прохождении волны «впрыскивания» критических зародышей, которые далее начинают расти в размерах за счет уменьшения плотности факела, приводя к увеличению его прозрачности. На последнем этапе поглощение опять начинает превалировать над рассеянием, при практически полной прозрачности факела. Этот эффект можно объяснить окончанием формирования конденсированной фазы материала мишени, т.е. прохождением на высоте зондирования волны «закалки».

1. Действие лазерного излучения большой мощности на металлы / Под ред. А. С. Бонч-Бруевича и М. А. Ельяшевича. М.: Наука, 1970. 272 с.
2. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. // УФН. 2002. Т. 172, № 3. С. 301–333.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Лазерный спектральный анализ. М.: Наука, 1966. 356 с.
4. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Щегрикович Д. В. // ИФЖ. 2011. Т. 84, № 4. С. 723–738.
5. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Макаров В. В., Щегрикович Д. В. // ИФЖ. 2013. Т. 86, № 4. С. 737–743.