

ОТРАЖЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ФАКЕЛА С КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗОЙ

Л.Я.МИНЬКО, В.И.НАСОНОВ

*Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси,
Ф. Скаршины 70, 220072 Минск, Беларусь*

Аннотация. Исследована динамика отражения при квазинепрерывном лазерном воздействии ($q = 0,1-10 \text{ МВт/см}^2$) на материалы в условиях сильной экранировки поверхности частицами конденсированной фазы в факеле. Получены количественные данные о взаимосвязи разрушения поверхности, поступления в факел конденсированной фазы и развития экранировки поверхности в ходе воздействия.

Особенностью воздействия миллисекундных импульсов квазинепрерывного лазерного излучения (ЛИ) с плотностью потока, превышающей порог разрушения материала, является образование сложного по фазовому составу приповерхностного лазерного эрозивного плазменного факела (ЛЭПФ), состоящего из нагретых паров (плазмы) и большого количества мелкодисперсных частиц и отдельных частиц материала мишени в твердой и жидкой фазах. Частицы конденсированной фазы оказывают существенное влияние на процесс лазерного воздействия, рассеивая и поглощая падающее ЛИ (Минько и др., 1985; Минько, Насонов, 1996). Взаимодействуя с частицами в факеле, ЛИ изменяет его оптические свойства, и картина лазерного воздействия сильно усложняется. Несмотря на обилие публикаций, посвященных отражению при лазерном воздействии, динамика отражения в условиях существенной и изменяющейся в ходе воздействия экранировки поверхности факелом с конденсированной фазой изучена недостаточно.

В данной работе, используя комплексный подход в изучении взаимодействия высокоэнергетического квазинепрерывного ЛИ с преградой с одновременной регистрацией в ходе воздействия различных характеристик состояния и свойств поверхности и факела, получены и проанализированы данные об эрозии мишени и выбросе продуктов эрозии из зоны воздействия, о формировании приповерхностного эрозивного плазменного факела, оптических свойствах поверхности мишени и факела (отражение, поглощение, рассеяние), роли давления, развиваемого в факеле на стадии воздействия, и динамике взаимосвязи свойств поверхности и факела. Основное внимание уделено изучению отражения в условиях воздействия. Данные экспериментов о других характеристиках воздействия служили дополнительной информацией при обсуждении рассматриваемых вопросов.

Использовался неодимовый лазер, генерирующий излучение плотностью мощности $q = 0,1-10 \text{ МВт/см}^2$ в зоне воздействия диаметром 3,5 мм и с гладкой формой лазерного импульса длительностью 1,5 мс. Мишенями служили образцы из Д16Т, А99, В1, Сu, латуни ЛС-59 и некоторых композитов класса стеклопластиков с различным исходным состоянием поверхности (полированные, шероховатые, химически травленные и др.)

В ходе экспериментов получены временные зависимости коэффициентов зеркального (R_z), диффузного (R_d) и полусферического ($R = R_z + R_d$) отражения материалов при различных плотностях мощности ЛИ. Одновременное измерение указанных коэффициентов позволило контролировать состояние поверхности и отслеживать физическую сторону процессов, протекающих на ней в ходе воздействия. Однако сопоставление данных об отражении и рассеянии свидетельствует, что в условиях разрушающего действия ЛИ на преграду, когда в ЛЭПФ поступит значительная доля материала мишени в конденсированной фазе, для описания энергетической стороны воздействия следует от системы падающее ЛИ - поверхность мишени переходить к рассмотрению системы ЛИ - ЛЭПФ - поверхность. При этом указанный коэффициент R следует понимать как коэффициент суммарных энергетических потерь за счет собственно отражения от поверхности в зоне воздействия и поглощения и рассеяния ЛИ частицами в факеле. Утверждение справедливо в предположении, что потери, связанные с плазмой в факеле, малы. Учитывая динамику поступления частиц в факел, связанную с формой лазерного импульса и зависящую от материала мишени (Минько и др., 1985; Гончаров и др., 1986; Уляков, 1967), при оценке энергетических потерь, связанных с частицами, следует иметь в виду, что в течение лазерного импульса эти потери не постоянны и зависят от момента их регистрации.

На рис. 1 приведены временные зависимости коэффициентов отражения и интенсивности свечения плазмы A_ϕ (в относительных единицах) композита ВФТ-С при двух значениях q (для ВФТ-С значение R_z мало и на графиках не показано). Поскольку при максимальных значениях A_ϕ (в максимуме лазерного импульса) коэффициент отражения композита не обнаруживает заметных изменений своего

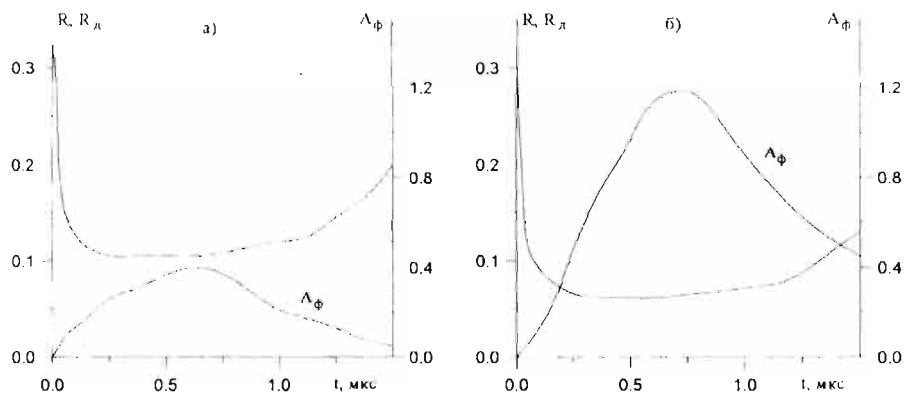


Рис. 1. Мишень ВФТ-С, а) - $q = 6.2 \text{ МВт/см}^2$, б) - $q = 9 \text{ МВт/см}^2$.

хода, и абсолютные значения R изменяются мало при переходе от воздействия с $q = 6.2 \text{ МВт/см}^2$ к воздействию с $q = 9 \text{ МВт/см}^2$, в то время как A_ϕ при этом увеличивается в три раза. можно сделать заключение, что влияние плазмы факела на отражение ЛИ в условиях экспериментов слабое.

По виду зависимостей можно предположить, что при воздействии квазинепрерывного ЛИ на материал на средней стадии лазерного импульса в используемом диапазоне q частицы материала мишени испаряются и перегорают, и вклад рассеяния ЛИ в энергетические потери невелик. Подъем R в конце лазерного импульса показывает, что на заключительной стадии воздействия, когда мгновенная плотность мощности $q(t)$ становится низкой, и частицы не разрушаются, рассеяние ЛИ на них значительно.

Аналогичный вид имеют и временные зависимости коэффициентов отражения, полученные с мишенями из металлов. При разрушающем воздействии на металлы на начальной стадии величины R_s и R_d резко изменяют свои значения, спустя некоторое время (свое для каждого материала) R_d и R выходят на стационарные значения, а затем в конце лазерного импульса для большинства металлов наблюдается подъем R_d и R , связанный с рассеянием ЛИ частицами в факеле. Но в отличие от случая воздействия на композит при воздействии на металл, по крайней мере на начальной стадии, зеркальная составляющая коэффициента отражения имеет достаточно высокое значение и связано это с относительно высокими исходными коэффициентами отражения металлов либо с оплавлением шероховатостей поверхности и приобретением ею заметных зеркальных свойств в ходе воздействия.

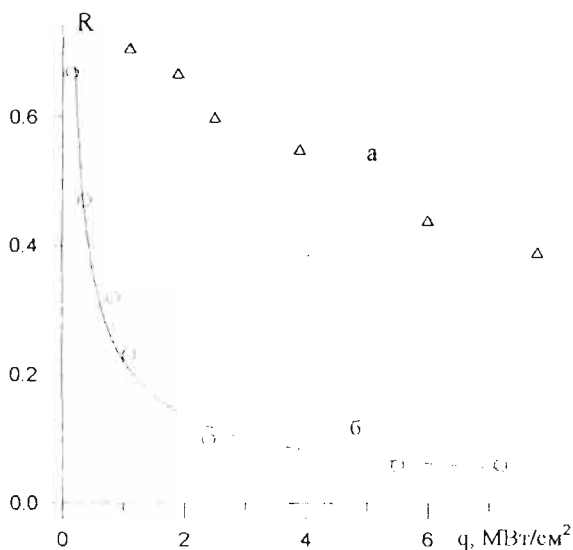


Рис. 2. Мишень: а - Д16Т, б - Вi

параметры висмута определяют специфику сложного взаимодействия ЛИ с частицами, плазмой факела и поверхностью мишени (Минько, Насонов, 1998). При достижении пороговых значений q на пути лазерного луча вследствие газодинамического разлета продуктов факела под действием развиваемого давления факел просветляется, а яркость свечения в зоне квазистационарного

На рис.2 приведены зависимости стационарных значений R от плотности мощности ЛИ при воздействии на полированные образцы мишеней из дюралюминия Д16Т и Вi. Обращает на себя внимание резко нелинейная зависимость $R = f(q)$ с висмутовой мишенью. Эксперименты показали, что при разрушающем воздействии ЛИ на висмут выбрасываемые в факел частицы имеют мелкодисперсный вид. Мелкодисперсность частиц и относительно низкие термодинамические

скачка уплотнения резко возрастает. При этом плазма в факеле, видимо, может влиять на характеристики оптического резонатора лазера. Наблюдаемому с V_i перегибу в ходе графика $R = f(q)$ при $q \sim 2$ МВт/см² в эксперименте соответствовало начало развития плазмы в факеле.

В экспериментах с металлами подробно исследовалось поведение R_c в зависимости от q ЛИ. Результаты исследований свидетельствуют о высокой чувствительности R_c к разрушению поверхности и появлению паров в факеле.

Методом измерения отражения в процессе воздействия на мишени из Д16Т и V_i при различных q получены количественные данные, позволяющие сделать оценки оптических свойств ЛЭПФ и связанных с ними энергетических потерь ЛИ. На основе анализа данных о коэффициентах отражения и интенсивности свечения плазмы в течение лазерного импульса при различных q установлено, что в условиях экспериментов с Д16Т и V_i , как и в случае с композитом ВФТ-С, вклад плазмы факела в поглощение ЛИ незначителен, а потери в факеле обусловлены главным образом экранирующим влиянием частиц эрозии мишени. При увеличении q в диапазоне 4-9 МВт/см² потери в факеле Д16Т монотонно возрастают и могут составлять 15-30%. С мишенью из V_i потери также возрастают с увеличением q и при $q = 0,94$ МВт/см² имеют максимальную величину (~30%). Однако при строгом учете вклада диффузной составляющей отражения R_d в энергетические потери в условиях большого количества частиц в факеле, рассеивающих ЛИ, данные о потерях могут быть уточнены в сторону больших значений.

Для оценки вклада лунки в энергетический баланс при воздействии на Д16Т определялись коэффициенты отражения холодной лунки при повторном облучении ее излучением малой интенсивности. Высокие значения коэффициентов отражения холодных лунок указывают на относительно слабую связь исходного состояния поверхности металлов с энергетическими потерями в лунке. Однако исходное состояние поверхности существенно влияет на поведение R_c , R_d , и R в ходе воздействия, особенно на начальной стадии и при низких q ЛИ.

Полученные результаты о согласованных изменениях R_c и R_d в совокупности с данными по рассеянию ЛИ достаточно полно отображают динамику разрушения мишени, поступление конденсированной фазы в факел, развитие экранировки поверхности и взаимосвязь указанных процессов в ходе лазерного воздействия.

Литература

- Минько Л.Я., Лопарев А.Н., Насонов В.И. и др.: 1985, *Квантовая электроника*, **12**, №6, 1211.
 Минько Л.Я., Насонов В.И.: 1996, *Хим. физика*, **15**, 114.
 Гончаров В.К., Карабань В.И., Остромецкий В.А.: 1986, *Квантовая электроника*, **13**, 1235.
 Уляков П.И.: 1967, *ЖЭТФ*, **52**, 820.
 Минько Л.Я., Насонов В.И.: 1998, *Журн. прикл. спектр.*, **65**, 126.