ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ У ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ В ВОЗДУХЕ

С. Г. АРУТЮНЯН, Г. А. ГАЛЕЧЯН, К. Р. ДАРБИНЯН, М. Г. ОГАНЕСЯН

Приведены результаты сравнительного исследования оптического пробоя в воздухе у поверхности металлических мишеней лазерным импульсом с длительностью 0,3 мс в пичковом и беспичковом режимах при плотности падающей мощности 1 ÷ 50 МВт/см². Интерферометром Маха-Цендера измерено изменение плотности плазмы во времени перед мишенью. Приводятся фотографии лазерного факела с выбросами жидкого металла.

Исследование низкопорогового оптического пробоя газа вблизи поверхности мишени представляет интерес в связи с большим числом применений этого явления в различных научно-технических и прикладных задачах [1, 2]. Кроме того, этот вопрос важен для выяснения динамики образования и распада плазмы с высокой концентрацией зарядов при относительно низких значениях плотности мощности падающего излучения лазера.

Первые результаты исследований низкопорогового оптического пробоя приведены в [3—6]. Дальнейшие исследования показали, что в зависимости от параметров мишени, лазерного луча и окружающего газа ответственным за это явление могут быть три различных механизма: 1) пробой паров вещества мишени при наличии значительного выброса [7, 8]; 2) инициирование пробоя термоэлектронами, эмиттируемыми с поверхности [9, 10]; 3) пробой воздуха при развитии ионизационной неустойчивости вследствие нагрева газа от мишсни (тепловой взрыв) [11—13].

Анализ работ [14, 15] показывает, что механизм пробоя и динамика его развития зависят от временной структуры импульса. В [14] использовался импульс лазера с ярко выраженной пичковой структурой, а в [15] — гладкий импульс с длительностью $\simeq 10$ мкс.

В настоящей работе приведены результаты сравнительного исследования оптического пробоя в воздухе у поверхности мишени из алюминия, меди и стали лазерным импульсом с длительностью $\simeq 0,3$ мс в пичковом и беспичковом режимах при плотности мощности падающего излучения на мишень 1 \div 50 MBt/cm². При помощи интерферометра Maxa—Цендера измерено изменение показателя преломления плазмы во времени непосредственно перед мишенью.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Для получения плазмы использовалось излучение модернизированного лазера ГОС-301, работающего на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм с длительностью

импульса до 0,4 мс по основанию. В режиме свободной генерации лазерный импульс имел ярко выраженную пичковую структуру с глубиной модуляции до 100% и скважностью $\simeq 3$. Введением длиннофокусной линзы (F = 100 см) в резонатор лазера удалось получить импульс со слабой пичковостью (глубина модуляции интенсивности луча доходила до $20 \div 30\%$).

Рис. 1. Схема эксперимента: 1— лазер ГОС-301, 2— зондирующий лазер ЛГ-44, 3— фокусирующая линза, 4— интерферометр Маха-Цендера, 5— мишень, 6— рассенвающая линза, 7— экран, 8— фотодиод, 9 запускающий фотодиод, 10— осциллограф С8-9А.



Излучение лазера при помощи линзы фокусировалось на поверлность мишени. Диаметр лазерного луча в фокусе не превышал 1 мм. Перед мишенью на расстоянии ≈ 1 см устанавливалась вертикальная щель, которая не препятствовала прохождению лазерного луча и развитию факела. Эта щель вырезала узкую полоску из выброса жидкого металла. Таким образом, на фотографиях, снятых сбоку, получено угловое распределение выброса жидкого металла. Эти фотографии при облучении мишеней из Al, Fe и Cu импульсом лазера, работающего в пичковом и беспичковом режимах, приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что выброс искр жидкого металла происходит вне конуса с углом раствора $30 \div 90^\circ$ в зависимости от материала мишени и плотности мощности лазерного излучения. На рис. 2e показано влияние кратера на угловое распределение выброса. Выброс при наличии кратера имеет острую направленность вперед.

Из приведенных фотографий следует, что выброс жидкой фазы из мишени в исследуемом диапазоне плотности падающей мощности имеет место только в пичковом режиме для мишеней из Al и Fe. Выброс жидкой фазы из медной мишени не наблюдается ни в пичковом, ни в беспичковом режимах. Из сравнения этого результата с результатом работы [15] (плотность падающей мощности — 5 ÷ 60 МВт/см², мишень из Al), где имел место чисто испарительный режим, можно сделать вывод о том, что выброс жидкой фазы связан с наличием ударных волн, возникающих при попадании каждого отдельного пичка на поверхность мишени, которая не успела остыть от предыдущего пичка. По-видимому при наличии плазмы перед мишенью каждый новый пичок вызывает пробой газа перед мишенью. Ударная волна достигает поверхности мишени, на которой имеется слой расплавленного металла, и вызывает разбрызгивание жидкого металла. Это объясняет тот факт, что искры появляются только в пичковом режиме, когда глубина модуляции интенсивности лазерного излучения достигает 100%, т. е. когда между пичками интенсивность спадает до нуля, пробой и испарение прекращаются [16]. Отсутствие выброса внутри конуса свидетельствует о наличии области высокого давления перед мишенью, которая образуется вследствие пробоя газа в объеме луча. В беспичковом режиме пробой и испарение имеют место непрерывно и ударные волны не возникают.



Рис. 2. Фотографии лазерного факела сбоку при наличии вертикальной щели перед мишенью: а — мишень Al, пичковый режим; б — мишень Al, беспичковый режим; в — мишень Fe, пичковый режим; г — мишень Fe, беспичковый режим; д — мишень Cu, пичковый режим; е — мишень Fe, имеет кратер, образовавшийся после нескольких выстрелов. На всех представленных рисунках энергия в импульсе — 30 Дж.

Интерферометрическое исследование лазерной плазмы проводилось ..ри помощи интерферометра 4 (см. рис. 1). Для зондирования плазмы использовался He-Ne-лазер 2 типа $\Lambda\Gamma$ -44, излучение которого после прохождения интерферометра при помощи линзы 6 проецировалось на экран 7 с отверстием, за которым находился фотодиод 8. Интерферометр настраивался таким образом, чтобы в отсутствие плазмы интерференционные полосы были достаточно широкими, $a/d \sim 10$, где a - ширина интерференционной полосы, d - диаметр отверстия (окна́ фотодиода) $\simeq 3$ мм. Сигнал от фотодиода подавался на запоминающий осциллограф C8-9A, который запускался от другого фотодиода, срабатывающего от излучения ламп накачки лазера ГОС-301. Зондирующий луч лазера в предметном плече интерферометра проходил на расстоянии ≈ 1 мм от поверхности мишени. Изменение показателя преломления плазмы может быть обусловлено изменением концентрации электронной компоненты плазмы или температуры газа, причем изменение температуры нейтральной компоненты может привести к сдвигу интерференционной картины максимум на 2 ÷ 3 полосы. В эксперименте же наблюдался сдвиг на 20 и более полос, что говорит о том, что ответственным за сдвиг полос является электронная компонента плазмы. Аналогичный результат был получен в [17] при исследовании лазерного факела в вакууме.

Набег фазы вследствие изменения показателя преломления плазмы, вызванного наличием электронной компоненты плазмы, дается выражением [18]

$$\partial_q = \frac{2e^2 n_e l}{!mc\omega},$$

где l — длина области взаимодействия зондирующего луча с плазмой, ω — частота излучения, n_e — плотность электронов плазмы, m и e — соответственно масса и заряд электрона, c — скорость света в вакууме.

Минимальное значение сдвига интерференционной полосы, устойчиво регистрируемое на фоне шумовых колебаний интерферометра, составляет $\simeq 0,2$. Для излучения *He-Ne*-лазера, $\lambda = 0,63$ мкм ($\omega = 3 \cdot 10^{15}$ с⁻¹), сдвигу интерференционной картины на 0,2 полосы при длине области взаимодействия ~ 2 мм соответствует изменение электронной плотности. $\Delta n_e = 1,8 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

На рис. 3 приведена характерная осциллограмма сигнала с фотодиода (мишень из Al, энергия в импульсе \simeq 30 Дж). Уменьшение амплитуды



Рис. 3. Характерная осциллограмма интерференционного сигнала с фотоднода: мишень из Al, энергия в импульсе 230 Дж, режим пичковый, развертка осциллографа — 500 мкс/дел.

интерференционной картины, по-видимому, обусловлено недостаточным пространственным разрешением фотодиода. При наличии плазмы градиент плотности приводит к уменьшению отношения a/d, а при уменьшении этото отношения амплитуда интерференционного сигнала уменьшается, сохраняя среднее значение.

Кроме того, из осциллограммы (рис. 3) видно, что имеет место поглощение зондирующего излучения в плазме. В результате этого одновременно с уменьшением амплитуды сигнала происходит уменьшение среднего значения интенсивности интерференционной картины.

Поглощение излучения в плазме может быть обусловлено наличием паров испаренного вещества или высокой плотностью плазмы, экранирующей излучение зондирующего лазера. Для экранировки излучения $\lambda = 0,63$ мкм необходимо достижение плотности $n_e = 3 \cdot 10^{21}$ см⁻³. Из осциллограмм интерференционного сигнала следует, что значительное поглощение зондирующего сигнала происходит уже при $n_e \sim 10^{19}$ см⁻³ Отсюда следует, что по-видимому доминирующим механизмом является поглощение излучения парами вещества мишени и пробой перед мишенью происходит в основном вследствие ионизации этих паров.



Рис. 4. Зависимость n_e (t) на стадии распада плазмы, построенная на основе осциллограмм интерференционного сигнала. Начало отсчета времени соответствует концу лазерного импульса.

На основе интерферограмм построена зависимость плотности плазмы от времени $n_e(t)$ на стадии распада плазмы для нескольких значений плотности падающей мощности, рис. 4. Характерное время распада плазмы, как видно из рис. 4, $\tau \lesssim 1$ мс, а для времени релаксации температуры плазмы имеем оценку $\tau_T \sim 0.1$ с. Это подтверждает предположение о том, что изменение набега фазы обусловлено изменением электронной компоненты вследствие распада плазмы.

НИИ физики конденсированных сред ЕГУ

Поступила 4. VIII. 1980

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Ф. В. Бункин, А. М. Прохоров. УФН, 119, 425 (1976).
- 2. Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов. Физическая и химическая обработка материалов, № 5, 7 (1977).
- 3. A. N. Pirri, R. Shlier, D. Northam. Appl. Phys. Lett., 21, 79 (1972).

62

- 4. А. И. Барчуков и др. Письма ЖЭТФ, 17, 413 (1973).
- 5. А. И. Барчуков и др. ЖЭТФ, 66, 965 (1974).
- 6. V. V. Kostin et-al. IEEE, J. Quantum Electronics, QE-2, 611 (1966).
- 7. E. L. Klosterman, S. R. Byron. J. Appl. Phys., 45, 4751 (1974).
- 8. Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Л. Галиев. Физика плазмы, 4, 332 (1978).
- 9. P. S. P. Wei, R. B. Hall. J. Appl. Phys., 44, 2311 (1973).
- 10. C. T. Walters, R. H. Barnes, R. E. Beverly. J. Appl. Phys., 48, 2937 (1978).
- 11. А. В. Бондаренко и др. Письма ЖТФ, 5, 221 (1979).
- 12. А. Ф. Настоящий. Квантовая электроника, 7, 170 (1980).
- 13. А. В. Бондаренко и др. Квантовая электроника, 7, 420 (1980).
- 14. Дж. Роди. Действие мощного лазерного излучения, Изд. Мир, М., 1974.
- 15. А. А. Бакеев и др. Квантовая электроника, 7, 349 (1980).
- 16. Л. И. Гречихин, Л. Я. Минько. ЖТФ, 37, 1169 (1967).
- 17. C. David et al. IEEE, J. Quantum Electronics, QE-2, 493 (1966).
- 18. Л. Н. Пятницкий. Лазерная диагностика плазмы, Атомиздат, М., 1976.

ՄԵՏԱՂՅԱ ԹԻՐԱԽԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՄՈՏ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐՊՄԱՆ ՊԼԱԶՄԱՅԻ ԻՆՏԵՐՖԵՐՈՄԵՏՐԻԿ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՕԴՈՒՄ

Ս. 2. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ. Ա. ԳԱԼԵՉՏԱՆ, Կ. Ռ. ԴԱՐԲԻՆՅԱՆ, Մ. Գ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

Բերված են օդում մետաղլա Բիրախների մակերևույթի մոտ 0,3 վրկ տեողությամբ և 1...50 Մվտ/ով2 Հղորության խտությամբ լաղերային խմտղուլսի առաջացրած օպտիկական պարպման համեմատական հետաղոտության արդյունըները կտրտված և հարթ իմպուլսի դեպջում։ Մախ-Ցենդերի ինտերֆերոմետրով չափված է պլաղմայի խտությունը Բիրախի մակերևույթի մոտ։ Բերված են լաղերային ջահի ֆոտոնվարները հեղուկ մետաղի արտաժայթրումներով։

INTERFEROMETRY OF OPTICAL BREAKDOWN PLASMA AT THE SURFACE OF METAL TARGET IN AIR

S. G. ARUTYUNYAN, G. A. GALECHIAN, K. R. DARBINYAN, M. G. HOVHANNISYAN

The results of comparative investigation of optical breakdown in air at the surface of metal targets with 0.3 msec laser pulse at spike and spikeless regimes for the density of emissive power $1 \div 50 \ MW/cm^2$ are given. The change of plasma density in time near the target is measured by means of Mach-Zehnder interferometer. The pictures of a laser torch with outflighting drops of liquid metal are given.