

УДК 533.951

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПЛОСКИМИ МИШЕНЯМИ

А. А. Ерохин, Ю. В. Коробкин, А. С. Шиканов, Е. Воловский<sup>1</sup>, Э. Воруна<sup>1</sup>, П. Парис<sup>1</sup>

*Приводятся результаты экспериментов по измерению спектров скоростей ионов и атомов при взаимодействии лазерного излучения с плотностью потока до  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> и длиной волны 1 мкм с плоскими мишенями из материалов с различными массовыми числами, таких как  $(\text{CH}_2)_n$ , Al, Си, Та. Исследована зависимость потоков нейтральных частиц от массового числа материала мишени и условий фокусировки лазерного излучения.*

При взрыве микрообъектов (в частности, в экспериментах с лазерной плазмой или плазмой, создаваемой пучком частиц) в разлетающемся веществе наряду с ионами содержатся нейтральные атомы, образованные в результате рекомбинации в процессе разлета с характерными скоростями  $\sim 10^7$  см/с. Очевидно, что с увеличением плотности и уменьшением температуры доля таких атомов возрастает. Анализируя распределение атомов по скоростям, можно сделать вывод о физических процессах, происходящих при микровзрывах.

Теоретическое и экспериментальное исследование данных процессов важно для многих прикладных вопросов, таких как процессы входа астероидов в пределы земной атмосферы, взаимодействие микрометеоритов с обшивкой корабля, светореактивное ускорение частиц, при оптимизации энергетического баланса процесса взаимодействия греющего излучения с облучаемыми лазером мишенями и т.п. В данном сообщении приведены результаты исследования нейтральной компоненты плазмы, полученной

<sup>1</sup>Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава, Польша.

при взаимодействии лазерного излучения с плоскими мишенями при плотностях потока  $\sim 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Работа проводилась на одноканальной лазерной установке Варшавского института плазмы и лазерного микросинтеза. Параметры пучка: энергия  $E_L \cong 15$  Дж, длительность импульса  $\tau = 1$  нс, длина волны  $\lambda = 1,06$  мкм, расходимость  $2\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$  рад, контраст излучения  $K = 10^6$ . Установка построена стандартным образом: задающий генератор, система временного формирования импульса, каскад усилителей, система пространственного формирования пучка на основе вакуумных пространственных фильтров и метода обращения волнового фронта (ОВФ) после предварительного каскада усиления, а также система фокусировки излучения на мишень, состоящая из асферической линзы и эллипсоидального зеркала [1].

Эксперименты по изучению спектральных закономерностей распределения нейтральных атомов проводились с помощью электростатического дефлектора ионов [2] и вторично-эмиссионного умножителя (ВЭУ) ЕМІ 9643/2 В. Ионный сигнал регистрировался кольцевым ионным коллектором [3]. Для наблюдения сигналов с ВЭУ и ионного коллектора использовался анализатор импульсов DSA 601 фирмы Textronix.

В эксперименте использовались мишени четырех видов:  $(CH_2)_n$ , Al, Cu, Ta. Схема диагностического комплекса представлена на рис. 1. Измерение распределения потоков нейтральных и заряженных частиц происходило на достаточно больших расстояниях от мишени. Ионный коллектор (ИК) устанавливался в дрейфовой трубе на расстоянии  $L_{ИК}$  от мишени ( $L_{ИК} = 91,5$  см для  $(CH_2)_n$  и 141,5 см для Al, Cu и Ta). За ионным коллектором на расстоянии  $L_{ВЭУ}$  от мишени ( $L_{ВЭУ} = 251$  см для  $(CH_2)_n$  и 201 см для Al, Cu, Ta) – вторично-эмиссионный умножитель (ВЭУ). Такое расположение позволяло получать ионные сигналы от ИК и ВЭУ (при разности потенциалов на дефлекторе равной нулю) или ионный сигнал от ИК и сигнал от нейтральных атомов от ВЭУ (при разности потенциалов на дефлекторе  $U$ ). Для очистки атомного пучка от ионов и электронов между коллектором и ВЭУ располагался электростатический ионный дефлектор (ЭИД), представляющий собой плоский конденсатор с двумя апертурными диафрагмами (разность потенциалов до 4 кВ; ширина входной щели, расположенной на расстоянии 0,5 см от пластин конденсатора,  $h \approx 0,3$  см; размеры пластин  $W \times L \times d = 2 \times 3 \times 0,5$  см<sup>3</sup>; на выходе из пластин, на расстоянии  $l = 1,7$  см помещалась диафрагма с диаметром отверстия  $2r_{ph} = 100$  мкм). Рассмотрим условия прохождения заряженных частиц через дефлектор при наложении электрического поля:

Распределение ионного пучка в плоскости диафрагмы определяется выражением

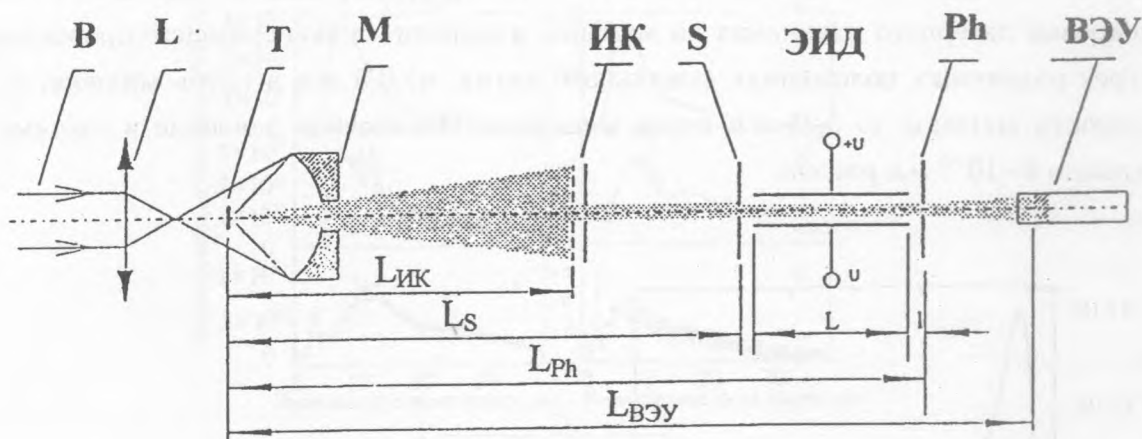


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. В – лазерный луч, L – асферическая линза, М – эллипсоидальное зеркало, Т – мишень, ИК – ионный коллектор, S – входная щель, ЭИД – электростатический дефлектор заряженных частиц, Ph – диафрагма, ВЭУ – вторично-эмиссионный умножитель.

$$Y = \frac{ez}{m_i v_i^2} \frac{2U}{d} L(L/2 + l) = \frac{ez}{E_i} \frac{U}{d} L(L/2 + l).$$

Для вывода ионов за пределы диафрагмы необходимо выполнение условия

$$Y \geq r_{ph} + h/2.$$

При  $U = \pm 2 \kappa B$  данная конструкция дефлектора позволяет очистить пучок от ионов с кинетической энергией (или скоростью)

$$E_i (\kappa эВ) \leq 364z \text{ или } v_i (\text{см/с}) \leq 6,8 \cdot 10^8 [z/A(a.e.m.)]^{1/2},$$

и электронов с кинетической энергией (или скоростью)

$$E_e (\kappa эВ) \leq 240 \text{ или } v_e \leq 2,2 \cdot 10^{10} \approx 0,73 c,$$

где  $z$  – зарядовое число,  $A$  – массовое число, выраженное в атомных единицах массы.

С целью исследования зависимости потоков ионов и нейтральных частиц от условий фокусировки лазерного излучения на мишень, измерения в эксперименте проводились при трех различных положениях фокального пятна: а) 0,5 мм в глубь мишени; б) на поверхности мишени; с) 0,25 мм перед мишенью. Остаточное давление в системе не превышало  $6 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст.

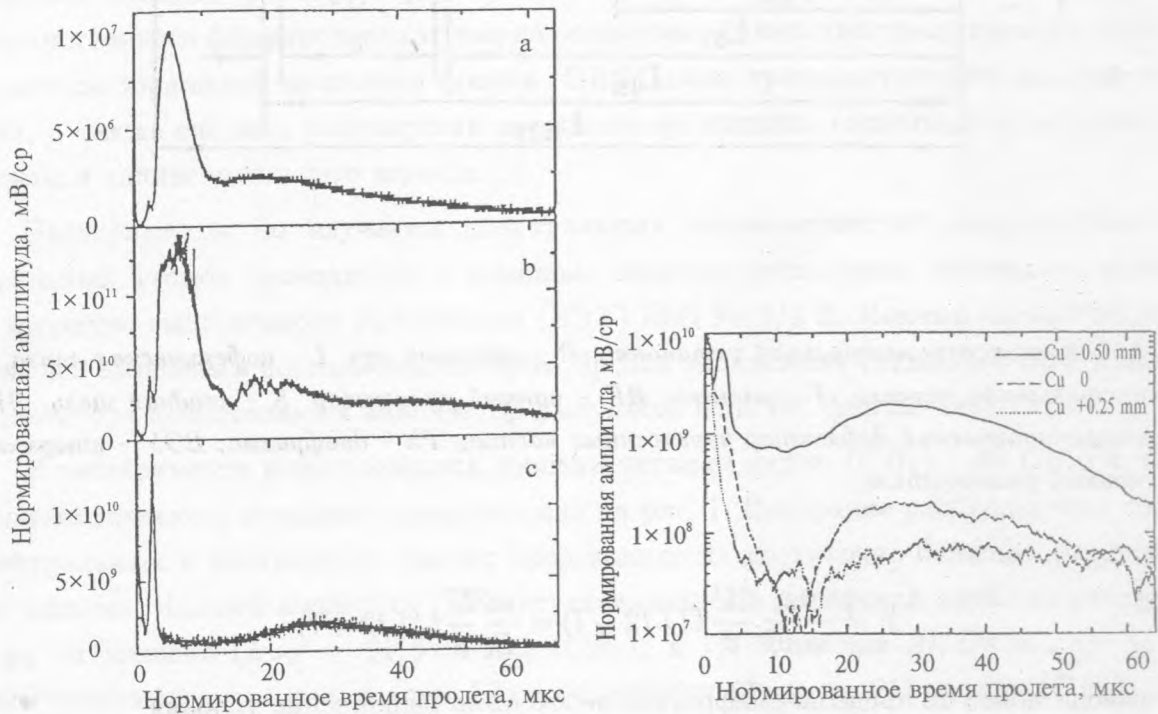


Рис. 2. Сигналы ионной и нейтральной компонент для Си. а – суммарный сигнал ионной и нейтральной компонент от ионного коллектора; б – суммарный сигнал ионной и нейтральной компонент от вторично-эмиссионного умножителя; с – сигнал нейтральной компонент от вторично-эмиссионного умножителя ( $E_L = 10$  Дж, фокусировка – 0,5 мм в глубь мишени).

Рис. 3. Сигналы нейтральной компоненты для Си, полученные при различных условиях фокусировки лазерного излучения на мишень ( $E_L = 10$  Дж). а – 0,5 мм в глубь мишени; б – на поверхность мишени; с – 0,25 мм над мишенью.

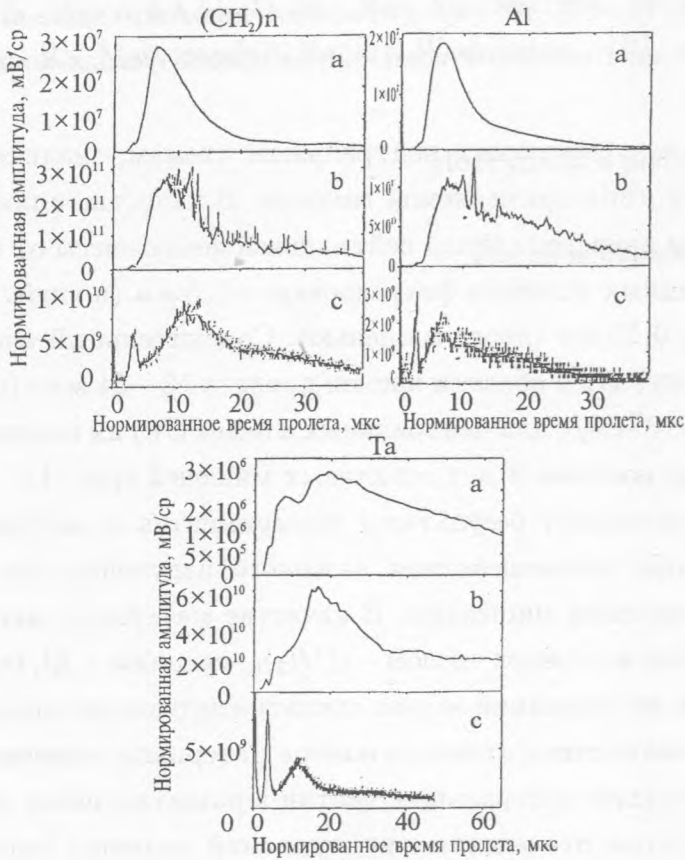


Рис. 4. Структура сигналов ионной и нейтральной компонент для различных мишеней (фокусировка - 0,5 мм в глубину мишени). а - суммарный сигнал ионной и нейтральной компонент от ионного коллектора, б - суммарный сигнал ионной и нейтральной компонент от ВЭУ; с - сигнал нейтральной компоненты от ВЭУ.

Результаты, полученные в эксперименте, приведены на рис. 2-4. Амплитуды и времена пролета нормированы на единицу телесного угла и расстояние  $L_{ВЭУ} = 201$  см. Проведем рассмотрение результатов на примере медной мишени (рис. 2, фокусировка на расстояние 0,5 мм в глубину мишени). На рисунке приведены следующие зависимости: а - суммарный сигнал ионной и нейтральной компонент от ионного коллектора, б - суммарный сигнал ионной и нейтральной компонент от вторично-эмиссионного умножителя, с - сигнал нейтральной компоненты от ВЭУ. Ионные сигналы от ИК и ВЭУ отвечают трем группам ионов: наиболее быстрая ( $v_i \sim (7-8) \cdot 10^7$  см/с) соответствует водородным ионам; вторая группа ( $v_i \sim (2-7) \cdot 10^7$  см/с) состоит из высокозарядных ио-



нов  $Cu$ ; третьей группе ( $v_i < 2 \cdot 10^7$  см/с) отвечают низкочарядные ионы  $Cu$ . Подобная структура ионного сигнала отвечает всем типам используемых мишеней и условиям фокусировки.

Структура сигналов, отвечающих нейтральным атомам, значительно зависит от условий фокусировки и типа применяемой мишени. В качестве иллюстрации рассмотрим рис. 3, на котором приведен сигнал нейтральной компоненты от  $Cu$ -плазмы, регистрируемый при различных условиях фокусировки:  $-0,5$  мм (в глубь мишени);  $0,0$  мм (в плоскость мишени);  $0,25$  мм (перед мишенью). Сравнительный анализ данных сигналов приводит к выводу, что в области времен пролета  $12 - 64$  мкс (соответствующей скоростям  $(0,31 - 1,7) \cdot 10^7$  см/с для нейтральных атомов  $Cu$ ) их соотношение  $100:32:20$ . Примерно такое же соотношение и для остальных мишеней (рис. 4).

Данная работа представляет результаты экспериментов по исследованию эмиссии нейтральных атомов при взаимодействии лазерного излучения при потоках  $q\lambda^2 \approx 10^{15}$  Втсм<sup>-2</sup>мкм<sup>2</sup> с плоскими мишенями. В качестве материала мишени использовались материалы с малым массовым числом –  $(CH_2)_n$ , средним –  $Al$ , большим –  $Cu, Ta$ . На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что с увеличением атомного номера материала мишени возрастает верхняя граница спектра энергии нейтральных частиц в разлетающейся плазме.
2. Важным результатом проведенных исследований является установление резкой зависимости сигнала нейтральной компоненты от условий фокусировки лазерного излучения на мишень.
3. Количество нейтральных атомов при данных потоках лазерного излучения мало по сравнению с количеством ионов независимо от условий фокусировки.
4. Максимальная амплитуда ионного сигнала уменьшается с увеличением массового числа материала мишени.
5. Сигналы от ионной и нейтральной компонент плазмы, полученные с помощью вторично-эмиссионного умножителя (ВЭУ), имеют пиковую структуру для мишеней с низким массовым числом:  $(CH_2)_n$  и  $Al$ . Для  $Cu, Ta$  пиковая структура присутствует только для нейтральной компоненты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты: 95-02-18750, 96-02-04267).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Takeuchi et al. Jap. J. Appl. Phys., **22**, 1709 (1983).

- [2] Saraff S., Woodall D. M. Rev. Sci. Instrum., **49**, no. 8, 1147 (1978).  
[3] Decoste R. Memorandum Report. Washington, NRL, no. 3774, 1978.

Поступила в редакцию 26 декабря 1996 г.

После переработки 10 сентября 1997 г.