

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

M 641

13-88-486 e

В.Е.Миронов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ
НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ
ПРИ РАЗЛЕТЕ ЭРОЗИОННОЙ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМ

1988

Анализ публикаций последних лет показывает, что задача создания простой и достаточно чувствительной методики регистрации импульсных потоков атомов малых энергий ($E \leq 500$ эВ) остается актуальной. Подобные потоки широко используются при напылении тонких пленок^{1/}, для диагностики процессов в плазменных установках^{2/}, в ряде других областей. В частности, для успешной эксплуатации лазерных источников атомов КУТИ^{3/} необходимо знание основных характеристик нейтральной компоненты плазмы, возникающей при воздействии излучения лазера (YAG: Nd³⁺, $t_u \approx 15$ нс, $E \leq 60$ мДж, $\lambda = 1,06$ мкм) на твердотельные мишени. В данной работе описана установка, предназначенная для получения таких характеристик, работа которой основана на зондировании плазмы потоками ионов из лазерного источника с энергией $E_i \approx 5$ кэВ и регистрации образующихся нейтралов перезарядки. Этот метод является в определенной степени развитием предложения об использовании для диагностики атомов процессов их перезарядки на ионах лазерной плазмы^{4/}.

Как известно^{5/}, при скоростях частиц $v \leq 10^7$ см/с сечение процесса перезарядки ионов на атомах может достигать $\sigma_{ex} \sim 10^{-15}$ см², при перезарядке взаимодействующие частицы практически не изменяют направления движения, поток перезарядки атомов из области взаимодействия прямо пропорционален концентрации исследуемых атомов $I_0 = I_+ n_0 \sigma_{ex} l_{вз}$ (I_+ — поток ионов в область взаимодействия, $l_{вз}$ — длина области взаимодействия). Влиянием заряженных компонент исследуемой плазмы можно пренебречь, т.к. сечение их взаимодействия с зондирующими ионами меньше σ_{ex} ^{5/}, а их процентное отношение к общему количеству частиц в плазме при плотностях потока лазерного излучения на мишень $q \leq 10^9$ Вт · см⁻² не превышает 10%^{4/}. Использование лазерного источника зондирующих ионов позволяет получать интенсивные потоки ионов практически любого твердотельного элемента и, соответственно, использовать резонансные процессы $A^+ + A^0 \rightarrow A^0 + A^+$, имеющие максимальное сечение. Общая схема созданной установки, работающей на этом принципе, показана на рис. 1. Излучение лазера 1 (YAG: Nd³⁺, размеры стержня $\phi 6 \times 75$ мм, многомодовый режим, $t_u \approx 15$ нс, $E \leq 60$ мДж) фокусировалось линзой 2 на поверхность массивной мишени 3. Образующиеся под действием лазерного излучения потоки нейтральных частиц при своем разлете в вакуум попадали в область, ограниченную диафрагмами 4-6, где происходило их взаимодействие с зондирующими ионами. В установке использовался лазерный источник ионов, состоящий из мишени 7, экспандера 8 и сеточных электродов 9, 10. Под действием излучения лазера

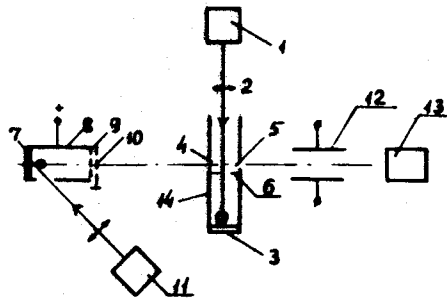


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

11 (однотипного с лазером 1) на мишень 7, образовывалась эрозионная лазерная плазма, расширяющаяся в экспандре. Потенциал мишени, экспандера и сеточного электрода 9 составлял +5 кВ, сеточный электрод 10 заземлялся. Выделенные из плазмы и ускоренные в промежу-

тке между электродами ионы имели энергию ($zU_0 + E_1'$), где U_0 — потенциал экспандера, E_1' — энергия свободного разлета ионов лазерной плазмы ($10 \div 100$ эВ), z — заряд ионов. Плотность потока излучения на мишень источника подбиралась так, чтобы доля ионов с зарядностью (+2) и выше не превышала 5%. Разлетаясь в вакуум, поток ионов проходил через область взаимодействия с исследуемыми атомами, где часть ионов в результате процессов перезарядки нейтрализовалась. В плоском конденсаторе 12, на который подавалось напряжение ~ 500 В, из потока удалялись заряженные частицы, нейтральные частицы регистрировались детектором 13 (ВЭУ-1). Расстояние от мишени 7 до области взаимодействия составляло $l_1 = 50$ см, расстояние от области взаимодействия до детектора $l_2 = 60$ см. Размеры диафрагм 4-6 составляли 0,2 см, расстояние от мишени 3 до области взаимодействия $l = 5$ см. Камера откачивалась до давления $p = 5 \cdot 10^{-6}$ Тор магниторазрядным насосом. Как правило, мишени 7 и 3 изготавливались из одного материала. Длительность ионного потока при отключенном конденсаторе 12 составляла 10-100 мкс, импульсы имели характерную форму с крутым передним фронтом и пологим спадом. Время пролета ионов с определенной энергией от мишени 7 до детектора 13 составляет $t_\Sigma = t_1 + t_2$, где t_1 — время пролета ионов до области взаимодействия с исследуемыми потоками, t_2 — время пролета от области взаимодействия до детектора. Для точного определения соотношения t_Σ и t_1 в области взаимодействия устанавливалась отклоняющая система из двух параллельных плоских электродов с размерами по оси разлета ионов 0,2 см. Один электрод заземлялся, на другой с определенной задержкой по отношению к срабатыванию лазера 11 подавался импульс напряжения с амплитудой $U = 100$ В и длительностью 0,1 мкс. Ионы, находившиеся в области взаимодействия, отклонялись от оси разлета; по времени появления "провала" в сигнале с детектора рассчитывалось t_1/t_Σ .

Подача напряжения на пластины конденсатора 12 приводила к практически полному отклонению всех заряженных частиц. В этих условиях вторично-электронный умножитель регистрировал только фотоны, возникающие в момент взаимодействия излучения с мишенями, и нейтральные частицы. При выключенном лазере 1 основной вклад

в сигнал ВЭУ давала нейтральная компонента эрозионной плазмы, возникающей в ионном источнике. В принципе, данные сигналы позволяли делать качественные оценки длительности и скорости разлета потоков атомов, возникающих при воздействии лазерного излучения на твердотельные мишени.

При работе лазера 1 и отключенном ионном источнике основной вклад в сигнал ВЭУ давали фотоны, возникающие в момент воздействия излучения на мишень. Экранировка области разлета образующейся плазмы позволяла уменьшить этот фоновый сигнал, однако полностью устранить его не удалось, что ограничивало сверху диапазон плотностей потока излучения на мишень 3. Размеры и геометрия экрана 14 выбирались так, чтобы свести к минимуму влияние отраженных от стенок потоков нейтральных частиц.

При работе лазеров 1 и 11 при определенных задержках между их запусками происходило резкое увеличение потока нейтральных частиц на ВЭУ. В наших условиях основной вклад в регистрируемый сигнал давали нейтралы с энергией $E \approx 5$ кэВ, появившиеся в результате резонансной перезарядки $A^+ + A^0 \rightarrow A^0 + A^+$. Количество перезарядившихся ионов не превышало 5% от их общего количества, что говорит о соблюдении условия "тонкой" перезарядной мишени. Величина сигнала детектора, измеряемая в определенный момент времени относительно срабатывания источника ионов $I_0(t_\Sigma)$, пропорциональна концентрации атомов в области взаимодействия $I_0(t_\Sigma) \sim n_0(t_1)$; зная соотношение t_Σ/t_1 и изменяя задержку между запусками лазеров t_3 , можно определить зависимость $n_0(t)$, где t — время, прошедшее после срабатывания лазера 1. Измерения $I_0(t_\Sigma)$ проводились в момент времени, соответствующий максимуму ионного тока на детектор. При каждой определенной t_3 проводилось усреднение $I_0(t_\Sigma)$ по 10 срабатываниям, затем t_3 менялось на 1 мкс. Как правило, за цикл измерений не происходило заметной эрозии материала мишени, что обуславливало повторяемость результатов. Через 10-20 циклов измерений для мишеней из In, Pb приходилось менять область воздействия излучения на мишень. В целом дисперсия значений $I_0(t_\Sigma)$ была $\sigma \approx 20\%$.

Измерения проводились для мишеней из C, Al, Zn, In, Pb. Перед началом измерений мишени прогревались при давлении $p \approx 1 \cdot 10^{-3}$ Тор и температуре $\approx 400^\circ$ С с целью удаления адсорбированных газов. Фокусировка излучения на мишени производилась линзами с фокусным расстоянием 10 см, диаметр области значительной эрозии материала мишени составлял, как правило, $d \approx 0,5$ мм. Изменение энергии лазерного излучения осуществлялось при помощи калиброванных светофильтров. Необходимо отметить, что значения плотности потока излучения, проводимые в тексте, имеют ориентировочный характер и вычислялись по формуле $q = (4E_{изл} / \pi t_u d^2)$, где $E_{изл}$ — энергия излучения, t_u — длительность импульса на полувысоте.

Абсолютная калибровка получаемых значений $n_0(t)$ не производилась, однако чувствительность методики можно определить по

порогу регистрации нейтралов, перезарядившихся на остаточном газе в вакуумной камере. Достаточно уверенно такие нейтралы регистрировались при давлении $p \approx 1 \cdot 10^{-6}$ Тор, что соответствует величине $n_0 \ell_{\text{вз}} \approx 3 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$. Таким образом, чувствительность использованной методики — порядка указанной величины. Временное разрешение метода определялось параметрами регистрирующей и синхронизирующей аппаратуры и составляло 0,5 мкс.

Для всех элементов, использованных в качестве материалов мишеней, в исследованном диапазоне плотности потока лазерного излучения q временные распределения плотности нейтральных частиц на расстоянии 5 см от области образования эрозионной лазерной плазмы имеют один максимум, резкий передний и пологий задний фронты. При этом максимальная скорость разлета нейтральных частиц в вакуум составляет $v_{\text{max}} \approx 10^6$ см/с, длительность на полувысоте $\Delta t_{1/2} / \ell \approx (1 \div 5)$ мкс/см. На рис. 2 приведены характерные зависимости $n_0(t/\ell)$ для мишени из графита С при различных q . Распределения нормированы на одинаковую амплитуду. Видно, что при повышении плотности потока излучения происходит увеличение v_{max} и небольшое увеличение длительности потока. Полученные распределения аппроксимировались кривой, соответствующей максвелловскому распределению атомов по скоростям с учетом скорости направленного движения сгустка частиц $n_0(r) = A \cdot r^{-3} \cdot \exp[-(\frac{1}{r} - u)^2 / a^2]$. При этом A — нормировочный коэффициент, $r = t/\ell$, u — скорость направленного движения сгустка атомов, $a = (2k_B T_0 / m)^{1/2}$, T_0 — начальная температура сгустка атомов,

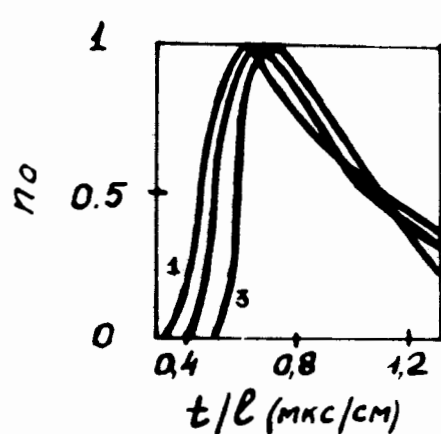


Рис. 2. Временные зависимости концентрации атомов углерода С. Плотность потока излучения на мишень q : I — $1 \cdot 10^9$ Вт · см $^{-2}$; II — $1,2 \times 10^9$ Вт · см $^{-2}$; III — $1,4 \cdot 10^9$ Вт · см $^{-2}$.

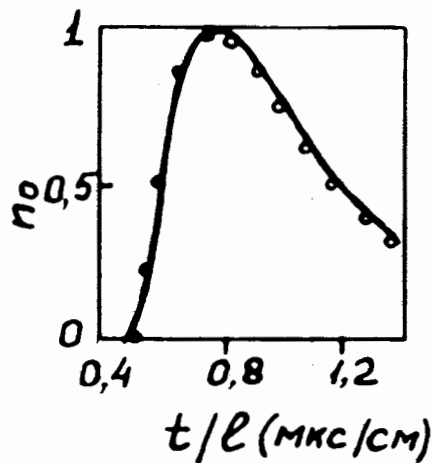
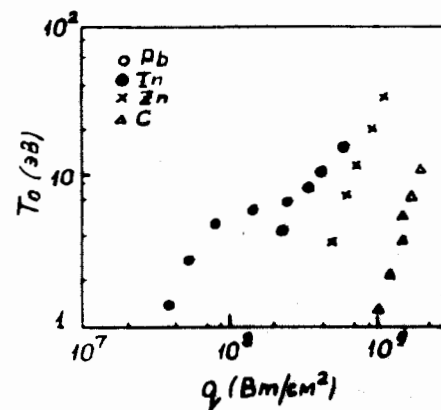


Рис. 3. Временная зависимость концентрации атомов цинка Zn при $q = 6 \cdot 10^8$ Вт · см $^{-2}$ (кружки) и аппроксимирующее ее максвелловское распределение ($T_0 = 20$ эВ, $u = 0$).

Рис. 4. Зависимости начальных температур сгустков атомов от q .



m — масса частиц, k_B — константа Больцмана. Аппроксимация производилась на мини-ЭВМ путем варьирования параметров u и a до достижения минимума суммы квадратов отклонений экспериментальной и расчетной кривых. Характерный результат представлен на рис. 3.

На рис. 4 показаны зависимости начальных температур сгустков различных элементов, полученные из аппроксимирующих максвелловских распределений, от q . При повышении энергии лазерного излучения для всех материалов происходит быстрый рост T_0 от значений $(1 \div 2)$ эВ вблизи порога по q до $(10 \div 20)$ эВ при $q \approx (3 \div 5) q_{\text{пор}}$ (верхняя граница q определялась уровнем фоновой засветки вторично-электронного умножителя). Скорости направленного движения сгустка в нашем случае составляли $u \leq 10^4$ см/с, т.е. намного меньше v_{max} .

ВЫВОДЫ

Создана установка, позволяющая регистрировать импульсные потоки атомов, входящие в состав эрозионной лазерной плазмы на стадии ее инерциального разлета в вакуум. Полученные временные характеристики разлета нейтралов достаточно хорошо описываются максвелловским распределением, характерные значения T_0 при $q \approx (3 \div 5) q_{\text{пор}}$ составляют $(10 \div 20)$ эВ, максимальные скорости разлета $v_{\text{max}} \approx 10^6$ см/с, длительность потока — $(1 \div 5)$ мкс/см.

Автор выражает глубокую признательность В.С.Александрову за помощь и поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быковский Ю.А. и др. В кн.: Термоэлектрические материалы и пленки. Л.: Наука, 1976, с.55.
2. Marmor E.S. et al. — Rev. Sci. Instrum., 1975, 46, p.1149.
3. Быковский Ю.А. и др. — ЖТФ, 1984, т.54, с.527.
4. Быковский Ю.А. и др. ОИЯИ, 13-83-807, Дубна, 1983.
5. Смирнов Б.М. Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. М.: Атомиздат, 1968.
6. Utterback N.G. et al. — Phys. Fluids, 1976, v.19, No.6, p.900.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июля 1988 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.
Д17-88-95	Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987.	5 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Миронов В.Е.

13-88-486

Определение концентрации нейтральных частиц при разлете эрозионной лазерной плазмы в вакуум

Описываются экспериментальная установка и методика исследования нейтральной компоненты эрозионной лазерной плазмы с помощью зондирования ионами. Использовался лазерный источник ионов. Получены временные зависимости концентрации нейтральных частиц на расстоянии 5 см от точки образования плазмы при плотности потока лазерного излучения q в диапазоне $(2 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^9)$ Вт·см⁻² для ряда материалов мишени. Проведена аппроксимация полученных распределений максвелловским распределением по скоростям.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Mironov V.E.

13-88-486

Determination of Neutral Particle Concentration at Dispersion of Erosion Laser Plasma into Vacuum

Experimental setup and methods for erosion laser plasma neutral component by ion probing are described. Laser ion source was used. Time distribution of neutral particle density at 5 cm from a point of plasma forming at laser radiation flux density q in $(2 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^9)$ V·cm⁻² range for various target materials were obtained. Obtained distributions were approximated by Maxwell velocity distributions.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика