

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

5802/83

9/11-83

P13-83-502

Ю.А.Быковский\*, В.Е.Миронов, В.П.Саранцев,  
С.М.Сильнов\*, Е.А.Сотниченко\*, Б.А.Шестаков

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Направлено в журнал "Письма в ЖТФ"

\* Московский инженерно-физический институт

1983

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при воздействии интенсивного лазерного излучения на вещество в продуктах разлета плазменного факела содержится большая доля нейтральных частиц. Однако анализ потоков таких частиц, как следует из опубликованных работ /см., например, /2/ /, проведен недостаточно подробно в связи с большими трудностями анализа нейтральных частиц малых энергий.

Получение энергетических спектров нейтральной компоненты лазерной плазмы, исследование динамики их формирования необходимы при использовании импульсных потоков атомов в ускорителях заряженных частиц /1/, для лазерного напыления /2/, а также важно с точки зрения получения более полной физической картины процессов формирования и разлета плазмы.

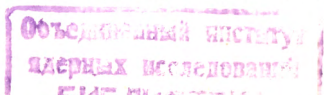
Целью экспериментов, представленных в данной работе, было получение энергетических характеристик потоков нейтральных атомов, образующихся при воздействии наносекундного лазерного излучения на поверхность твердотельной мишени, а также исследование динамики формирования энергетических спектров таких потоков при различных плотностях потока излучения.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе проведены экспериментальные исследования нейтральной компоненты лазерной плазмы, образованной излучением неодимового лазера в диапазоне плотностей потока  $2 \cdot 10^7 \div 8 \cdot 10^9 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ . Лазер /ЛТИПЧ-8/ работал в режиме модулированной добротности со следующими параметрами импульсов излучения: длина волны  $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ , энергия  $E$  - до  $0,06 \text{ Дж}$ , длительность  $\tau = 10 \text{ нс}$ .

При воздействии излучения лазера с модулированной добротностью резонатора на поверхность образца образуется высокотемпературный плазменный сгусток, состоящий из ионов различного заряда, электронов и нейтральных атомов. Так как наиболее простым и информативным для анализа частиц является времяпролетный масс-спектрометрический метод, то он был выбран в нашей работе в качестве основного. Предварительно из лазерной плазмы удалялись заряженные ионы, которые могут давать ложные сигналы, поскольку для регистрации спектров нейтральных частиц были использованы различные способы их ионизации электронными потоками.

Первоначально была сделана попытка зарегистрировать ионизацию нейтральных частиц лазерной плазмы с помощью источника, который применяется в серийно выпускаемых приборах МСХ-4. Но, к сожа-



лению, нам не удалось получить стабильных, достоверных результатов, по которым можно было бы судить о характеристиках нейтральной компоненты лазерной плазмы. Это, видимо, связано с рядом недостатков применения источника для таких целей, а именно:

- 1/ малым временем взаимодействия с пучками нейтральных частиц из-за их высокой скорости направленного движения;
- 2/ отсутствием возможности захвата ионов в "ловушку" /потенциальную яму/ для эффективности ионизации;
- 3/ вынужденным использованием его на больших расстояниях от места образования лазерного факела, приводящим к уменьшению плотности ионизируемых нейтральных атомов;
- 4/ малыми токами электронов /несколько десятков мА/;
- 5/ узкой зоной взаимодействия электронов с атомами /порядка миллиметра/.

Эти недостатки потребовали разработки новых источников для ионизации нейтральных частиц лазерной плазмы.

Первый способ заключается в том, что для ударной ионизации нейтральной компоненты использовались электроны исследуемой лазерной плазмы. Как хорошо известно/3/, электроны на больших расстояниях от точки образования плазмы /больше нескольких десятков миллиметров/ имеют очень малые энергии направленного движения; плазма при этом бесстолкновительная. Поэтому для того чтобы электроны приобрели достаточную для ионизации атомов энергию, необходимо нарушить квазинейтральность плазмы и ускорить электроны. Относительно длительное время взаимодействия и высокая плотность электронной компоненты обуславливают эффективную ионизацию атомов лазерной плазмы. ток таких электронов в области ионизации в наших условиях достигал двух ампер.

Второй способ состоял в том, что для ударной ионизации атомов использовались электроны от стороннего лазерного источника/4/. Потоки атомов формировались посредством разделения заряженной и нейтральной компонент с последующим удалением заряженной. Ионизация оставшихся нейтральных частиц производилась в специальном ионизаторе, куда направлялся электронный пучок. Имелась возможность изменять время взаимодействия между импульсом электронного тока и потоком анализируемых атомов, что позволяло изучать нейтральную компоненту в широком временном диапазоне.

По осциллограммам ионных импульсов рассчитывались скорости образованных ионов и по распределению электронной плотности в области ионизации восстанавливались энергетические распределения атомов, формирующиеся при воздействии лазерного излучения на мишень. В дополнение к определению энергий по времени пролета использовался метод задерживающего потенциала: в конце времяпролетного тракта стояла система из двух сеток, которая позволила анализировать энергии ионов, а также отсекал ионы остаточного газа. Результаты ионизации атомов "собственными" электронами сравнивались с данными, полученными с помощью лазерного электронного источника.

Для исследования нейтральной компоненты лазерной плазмы была создана экспериментальная установка, принципиальный вид которой показан на рис.1. Расстояние от мишени до области ионизации составляло 14 см, а длина времяпролетного тракта - 130 см. Лазерное излучение /Л2/ /1/ вводилось в камеру через набор фильтров /2/ и окно /3/, затем фокусировалось линзой /4/ и попадало на мишень /5/, расположенную в экспандере /6/. Потоки нейтральных атомов из лазерной плазмы выделялись системой, состоящей из экспандера /6/ и диафрагм /7/, на которые подавалось напряжение до 20 кВ для удаления заряженной компоненты. Далее поток нейтральных атомов попадал в ионизатор /8/, где он ионизировался электронным ударом. Лазерный источник работал следующим образом. Излучение лазера /Л1/ /9/ вводилось через окно /10/, фокусировалось линзой /11/ и попадало на мишень /12/, помещенную в экспандер /13/. Подаваемое между экспандером и диафрагмой /14/ напряжение вытягивало электронную компоненту из лазерной плазмы; электроны направлялись в ионизатор. Размеры экспандера и диафрагмы после оптимизации были выбраны следующими: длина экспандера - 50 мм, диаметр отверстия в крышке - 3 мм, а в диафрагме - 6 мм, расстояние между диафрагмой и экспандером - 10 мм. К этому промежутку прикладывалось напряжение +100:500В. В электронном источнике в качестве эмиттера была выбрана пластина из вольфрама. Ионизатор представлял собой металлическую трубу, в которой размещалась система сеточных электродов. Между сетками /15/ и /16/ создавалось электрическое поле, направляющее электроны вдоль оси детектирования нейтральных атомов. Сеточные электроды /16/ и /17/ находились под одним потенциалом и ограничивали область ионизации. Длина области ионизации оптимизировалась и была выбрана равной 6 мм /на рис.2 приведена зависимость величины сигнала от длины области ионизации/. Между сетками /17/ и /18/ существовало ускоряющее ионы электрическое поле. Ускоренные ионы разделялись

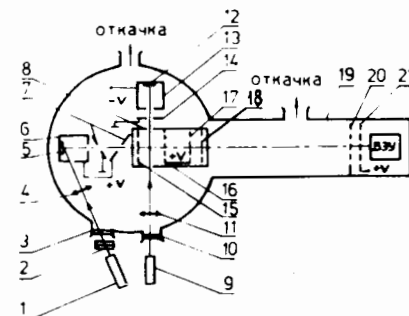


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

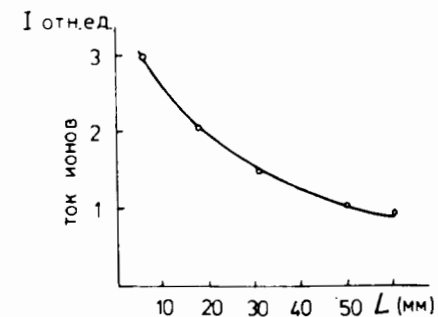
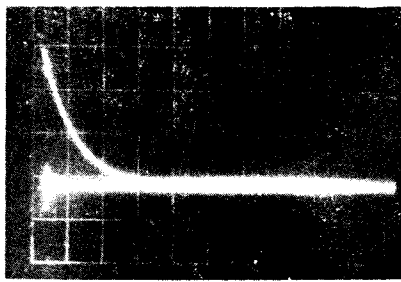
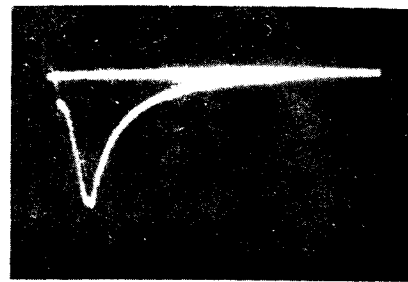


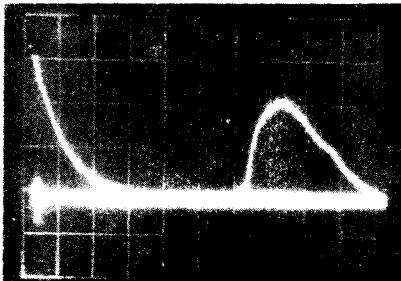
Рис.2. Зависимость амплитуды сигнала от длины области ионизации.



а



б



в

Рис.3. Характерные осциллограммы: а/ сигнал засветки на ВЭУ от лазерного факела после удаления заряженной компоненты /1 деление - 10 мкс, 0,02 В/; б/ сигнал электронного тока из лазерного источника электронов /1 деление - 5 мкс, 10 В/; в/ сигнал ионизованных атомов свинца /1 деление - 10 мкс, 0,02 В/.

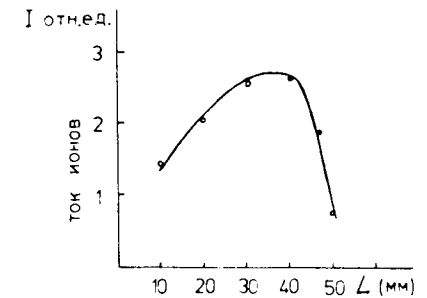
по скоростям во времяпролетном анализаторе /19/. Система из двух сеточных электродов /20/ и /21/ позволяла методом задерживающего потенциала анализировать энергии образовавшихся ионов, а также отсекал ионы остаточного газа, имеющие тепловые скорости. Детектором являлся вторично-электронный умножитель ВЭУ-1А.

На рис.3 представлены характерные осциллограммы. На осциллограмме рис.3а виден сигнал засветки на ВЭУ от лазерного факела после удаления заряженной компоненты. При включении лазерного источника электронов /рис.3б/ появляется сигнал ионизованных атомов /рис.3в/. Для калибровки по массам в систему напускался ксенон Хе.

Система синхронизации позволяла изменять и контролировать время между запусками первого /Л1/ и второго /Л2/ лазеров, что давало возможность стробировать электронным импульсом сгусток нейтральных атомов.

При ударной ионизации "собственными" электронами лазерной плазмы ионизатор состоял из двух сеточных электродов. Заземленный сеточный электрод /15 на рис.1/, имевший размер ячейки порядка радиуса Дебая, нарушал квазинейтральность плазмы. Ускоряющим электродом служила сетка /16/. Расстояние между дебаевским и ускоряющим электродами оптимизировалось. На рис.4 показана

Рис.4. Зависимость амплитуды сигнала от расстояния между сеточными электродами.



зависимость величины сигнала от расстояния между электродами. Следует отметить, что экспериментальная установка позволяла без нарушения вакуума проводить исследования двумя методиками. Рабочий вакуум в измерительной камере был не хуже  $1 \cdot 10^{-6}$  Тор.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ранних работах Ю.А.Быковского с сотрудниками /см., например, /5// было показано, что существует порог плотности потока излучения -  $q \sim 10^8$  Вт·см<sup>2</sup> /для различных веществ он колеблется в определенных пределах/, ниже которого в пределах чувствительности аппаратуры не наблюдается образования плазменного сгустка. При изучении низкоэнергетичной части спектра ионов /6/ было подтверждено существование такого порога плотности потока излучения и установлено, что ниже него работают тепловые механизмы испарения вещества. Подтверждением этому являются результаты, представленные на рис.5, на котором изображено энергетическое распределение атомов свинца. При наложении на этот спектр Больцмановской функции распределения наблюдается удовлетворительное совпадение, что, несомненно, говорит о тепловом механизме образования нейтральных атомов при низких плотностях потока излучения.

Формирование энергетических характеристик и абсолютный выход нейтральных атомов в значительной степени зависят от плотности потока лазерного излучения  $q$  на мишени. С ее увеличением происходит расширение и сдвиг энергетического спектра атомов как целого в область больших энергий. На рис.6 показаны спектры энергий направленного движения атомов при различных  $q$ , поясняющие динамику формирования энергетических спектров с ростом плотности потока лазерного излучения. При пороговых плотностях потока излучения форма спектров отличается от Больцмановской. В первую очередь это связано с ростом числа атомов, появившихся при комбинации ионов.

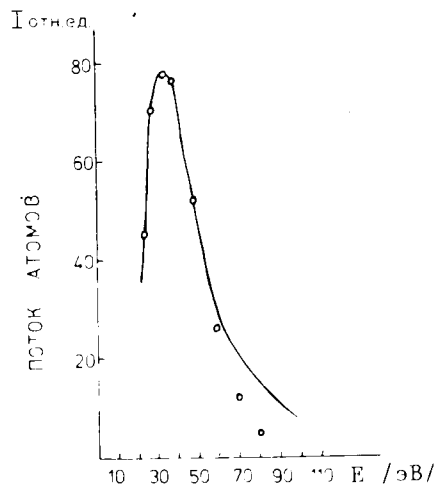
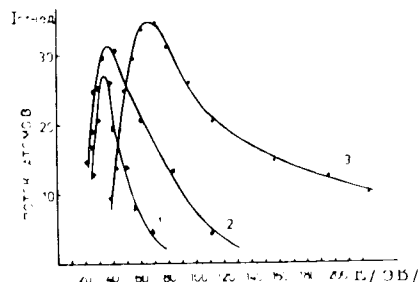


Рис.5. Энергетический спектр атомов свинца /—/ и больцмановское распределение /o/.

Рис.6. Энергетические спектры атомов свинца при различных значениях плотности потока лазерного излучения: 1 -  $q \approx 5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>; 2 -  $q \approx 1 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; 3 -  $q \approx 3 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Погрешность измерений — 20%.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
2. Ахсахалян А.Д. и др. ЖТФ, 1982, т.52, вып.8, с.1584.
3. Быковский Ю.А. и др. Квантовая электроника, 1975, т.2, № 5, с.989.
4. Богданкевич О.В. и др. ЖТФ, 1965, т.35, с.2052.
5. Быковский Ю.А. и др. ЖТФ, 1969, 39, вып.7, с.1272.
6. Арзуманян Г.М. и др. ОИЯИ, Р7-82-749, Дубна, 1982.

## ВЫВОДЫ

1. В работе двумя способами проведены исследования по определению энергетических спектров нейтральных частиц лазерной плазмы.
2. Характер формирования энергетических распределений нейтральных атомов лазерной плазмы в значительной степени зависит от плотности потока лазерного излучения.
3. Установлено, что при низких плотностях потока излучения /до пороговых/ энергетический спектр нейтральных частиц носит тепловой характер.
4. С ростом плотности потока излучения /больше порогового значения/ в энергетическом спектре появляются атомы, имеющие рекомбинационную природу.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 июля 1983 года.

### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

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

Быковский Ю.А. и др. P13-83-502  
Энергетические распределения нейтральных атомов лазерной плазмы

Приводятся описания экспериментальной установки, методики и результатов исследования нейтральной компоненты лазерной плазмы с помощью ионизации электронным ударом. Для ионизации использовались электроны отдельного лазерного источника, а также электроны исследуемой плазмы. Получены распределения атомов свинца в области энергий  $/10 \div 200/$  эВ в зависимости от значения плотности потока лазерного излучения  $q$  в диапазоне  $/2 \cdot 10^7 \div 8 \cdot 10^9/$  Вт·см<sup>-2</sup>. Экспериментально установлено, что при низких значениях  $q$  энергетическое распределение атомов носит тепловой характер, а с ростом  $q$  в спектре появляются атомы, имеющие рекомбинационную природу.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Bykovskij Yu.A. et al. P13-83-502  
Energy Distribution of Neutral Atoms of Laser Plasma

The experimental installation, techniques and investigation results on neutral component of laser plasma using ionization electron impact are described. For ionization the separate laser source electrons and electrons of plasma under investigation have been used. Distributions of Pb atoms have been obtained in the energy range from 10 to 200 eV for laser fluxes ranging from  $2 \cdot 10^7$  to  $8 \cdot 10^9$  W/cm<sup>2</sup>. It has been experimentally established that for low values of  $q$  energetic distributions of atoms have thermal character and with increasing  $q$  recombinative atoms appear in the spectrum.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой