

УДК 533.9

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И ЗАРЯДОВЫЙ СОСТАВ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧАЕМОЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ ИЗ Gd И Al

В. Н. Пузырёв¹, А. Т. Саакян¹, А. Н. Стародуб¹, Б. Р. Фахриев¹,
А. А. Фроня^{1,2}, О. Ф. Якушев¹

Проведены исследования энергетического спектра и распределения суммарного заряда от энергии ионов для плазмы, создаваемой при воздействии частично-когерентного излучения лазера на неодимовом стекле с плотностью мощности в пятне фокусировки $\sim 10^{13}$ Вт/см² на сплошные пластины из гадолиния (Gd) и алюминия (Al). Приведены спектры ионов плазмы для мишени из гадолиния при значениях энергии лазерного излучения 2 Дж, 7 Дж и 20 Дж, а для мишени из алюминия – при энергии лазерного излучения 1 Дж. Для мишени из гадолиния с повышением энергии воздействующего излучения зафиксирован рост амплитуд пиков на спектрах ионов, а также проявление более высокоэнергетических ионов. Также зарегистрирована разница в эмиссии ионов для мишеней из гадолиния и алюминия при близких значениях энергии излучения – 2 Дж и 1 Дж, соответственно.

Ключевые слова: лазерная плазма, энергетический спектр, зарядовый состав, гадолиний, алюминий.

Введение. При облучении мишеней из различных материалов мощным лазерным излучением температура образываемой плазмы может достигать нескольких кэВ [1–3]. В подобной плазме возможно образование высокоэнергетических ионов, обладающих высокой степенью ионизации. Использование масс-спектрометрических диагностик дает возможность определить зависимость отношения массы к заряду ионов от времени

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: artsahakyan@yandex.ru.

² НИЯУ “МИФИ”, 115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: nastya708@yandex.ru.

детектирования, что вкупе с использованием времяпролетных методов изучения ионов позволяет судить о зарядовом распределении ионов в изучаемой плазме. Подробное изучение этой информации актуально, например, с точки зрения использования лазерной плазмы как источника высокоэнергетических ионов [1–3], а также применения высокоионизованной плазмы для генерации высших гармоник [4].

В данной статье представлены результаты исследования энергетического спектра и распределения суммарного заряда по энергии ионов для плазмы, получаемой при облучении мишеней из гадолиния (Gd) и алюминия (Al). Исследования были проведены на установке “Канал-2”, одной из особенностей которой является наличие большого числа поперечных мод и широкого спектра в излучении лазера, что повышает однородность облучения мишени и снижает количество мелкомасштабных всплесков на профиле интенсивности в поперечном сечении пучка [5]. Плазма индуцировалась лазерным импульсом с длиной волны 1.06 мкм и длительностью по полувысоте 2.5 нс. Энергия излучения в одном импульсе варьировалась в диапазоне от 1 Дж до 20 Дж, при этом плотность мощности сфокусированного на мишени излучения составляла $\sim 1.8 \cdot 10^{12}$ – $3.5 \cdot 10^{13}$ Вт/см².

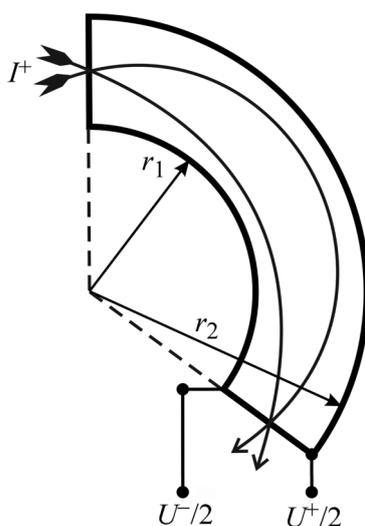


Рис. 1: Принцип действия масс-спектрометра Юза-Рожанского.

Диагностический канал. Для измерения потока ионов использовался цилиндр Фарадея с трансимпедансным усилителем и масс-спектрометр по схеме Юза-Рожанского с 127-градусным сектором отклоняющих электродов, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Внутренний радиус конденсатора $r_1 = 35$ мм, внешний – $r_2 = 45$ мм,

расстояние от плазмы до детектора составляло 2 метра, а диапазон регистрируемых энергий ионов масс-спектрометра – 0.2–100 кэВ. Каждый спектр определялся соотношением $\frac{E}{z} = \frac{eU}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$, где E – энергия иона, z – заряд иона, e – заряд электрона, U – разность потенциалов на электродах.

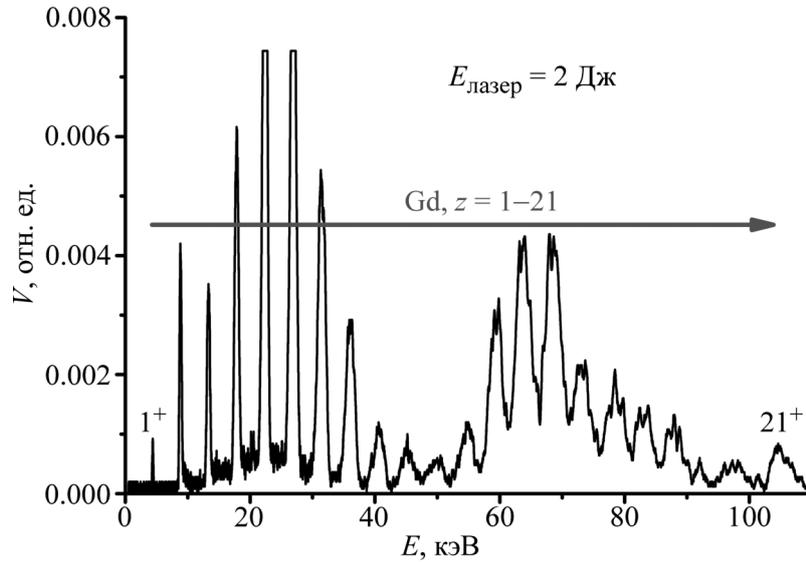


Рис. 2: Спектр ионов плазмы для мишени из гадолиния при энергии излучения 2 Дж.

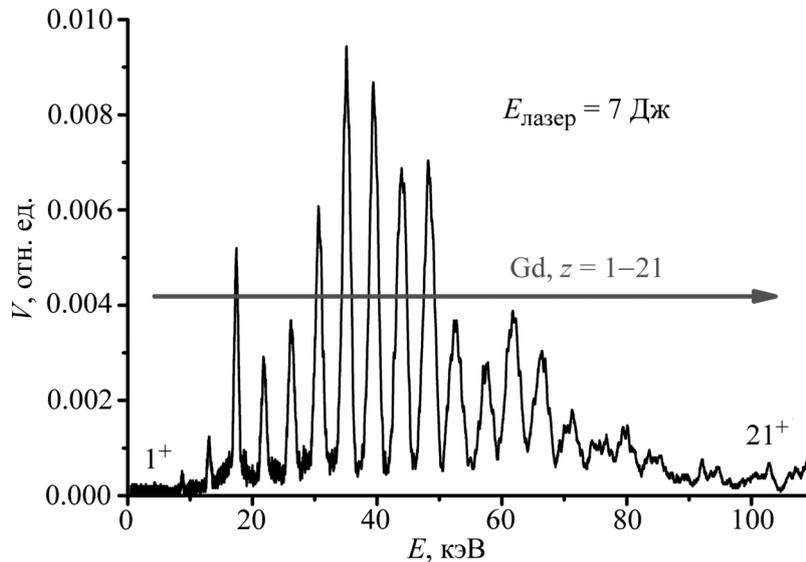


Рис. 3: Спектр ионов плазмы для мишени из гадолиния при энергии излучения 7 Дж.

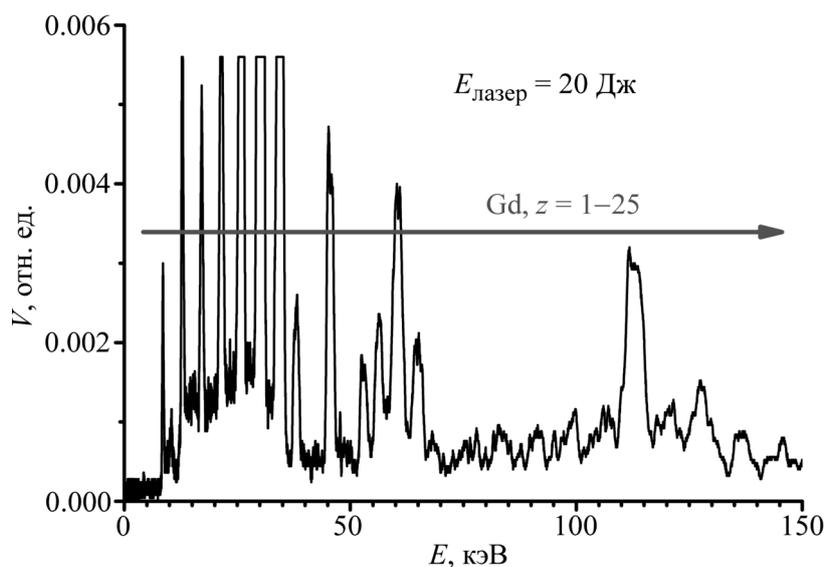


Рис. 4: Спектр ионов плазмы для мишени из гадолиния при энергии излучения 20 Дж.

Экспериментальные результаты. Из результатов для гадолиния видно (рис. 2–4), что при энергиях лазерного излучения 2 Дж и 7 Дж проявившимся максимальным ионом является 21-ый, тогда как при энергии излучения 20 Дж в спектре присутствуют ионы вплоть до 25-го. Здесь V – уровень сигнала с цилиндра Фарадея в относительных единицах, который пропорционален произведению числа и заряда ионов. Также можно заметить, что при повышении энергии излучения с 2 Дж до 7 Дж возрастают пики ионов с 8-го по 12-ый, тогда как амплитуды остальных незначительно понижаются. Данное явление связано с перезарядкой ионов внутри плазмы, плотность которой возрастает с повышением энергии воздействующего лазерного излучения. Практически аналогичная картина наблюдается и при повышении энергии излучения с 7 Дж до 20 Дж.

На рис. 5 приведён спектр многозарядных ионов плазмы для мишени из алюминия при энергии лазерного излучения 1 Дж, из которого видно, что максимальным проявившимся является 9-ый ион. Если сравнить рис. 5 и 2, то можно заметить разницу в эмиссии ионов для мишеней из гадолиния и алюминия при близких значениях энергии излучения – 2 Дж и 1 Дж, соответственно. Данный факт связан с разницей в исходном заряде вещества мишени, от которого зависит и плотность возникающей плазмы, в которой происходят столкновительные процессы, влияющие на появление высокоэнергетических ионов.

Также при помощи цилиндра Фарадея в рамках приближения сферического разлета плазмы были получены зависимости суммарного заряда ионов плазмы от их энергии

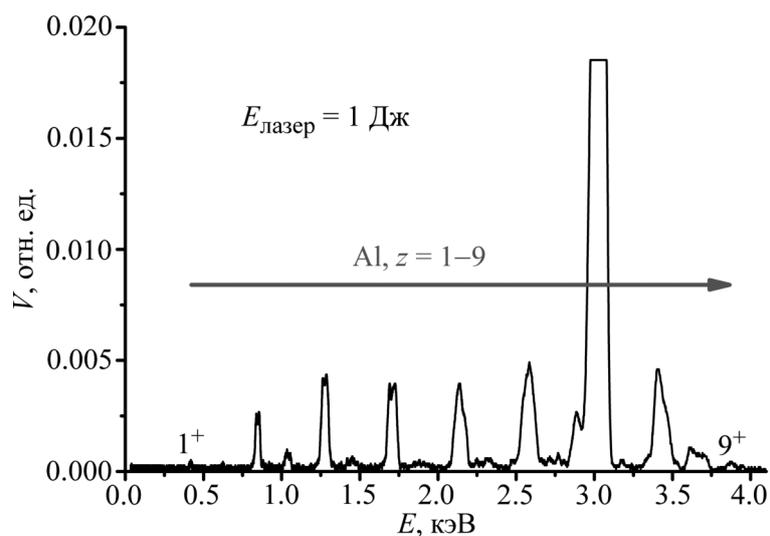


Рис. 5: Спектр ионов плазмы для мишени из алюминия при энергии излучения 1 Дж.

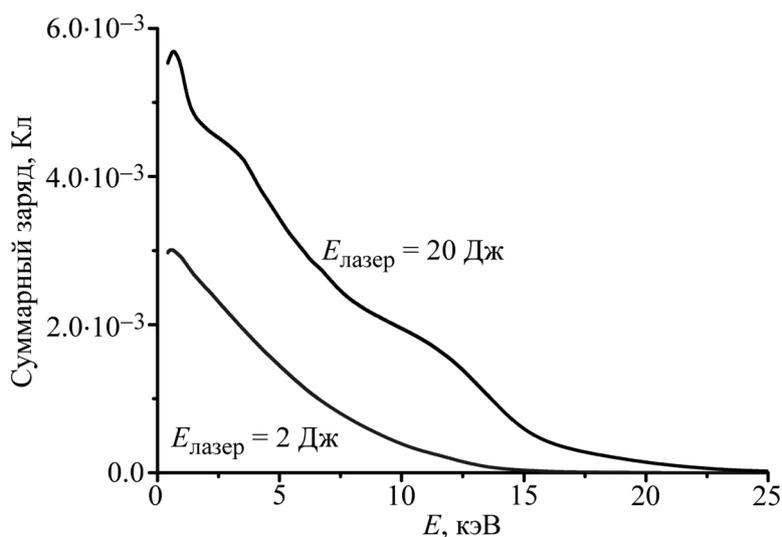


Рис. 6: Зависимость суммарного заряда ионов плазмы от их энергии в случае мишени из гадолиния при минимальном 2 Дж и максимальном 20 Дж значениях энергии излучения.

для мишеней из гадолиния и алюминия, которые приведены на рис. 6 и 7, соответственно. Из рис. 6 видно, что повышение энергии лазерного излучения приводит к значительному возрастанию числа как низкоэнергетических ионов, так и ионов с энергиями до 25 кэВ. Следует отметить, что при получении спектров ионов на электроды подавалось напряжение, позволяющее зарегистрировать ионы с максимальным заря-

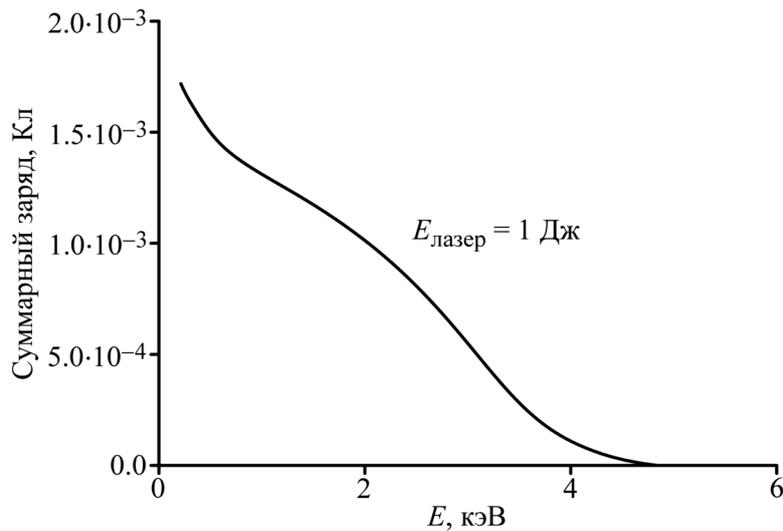


Рис. 7: Зависимость суммарного заряда ионов плазмы от их энергии в случае мишени из алюминия при значении энергии излучения 1 Дж.

дом. Благодаря этому, например, на рис. 4 хорошо заметен пик 21-го иона гадолиния с энергией 113 кэВ. Однако в абсолютных значениях количество высокоэнергетичных ионов гадолиния на порядки меньше низкоэнергетических, что и проявляется на графиках суммарного заряда ионов плазмы на рис. 6.

Выводы. С помощью цилиндра Фарадея измерено распределение суммарного ионного заряда плазмы, создаваемой при воздействии лазерного излучения с управляемой когерентностью на мишени из гадолиния и алюминия. Для мишени из гадолиния при увеличении энергии воздействующего излучения суммарный заряд и количество заряженных частиц растут, однако для диапазона использованных в экспериментах значений энергии лазерного излучения вклад высокоэнергетических ионов в суммарный заряд плазмы остается мал.

В случае мишени из гадолиния при значениях энергии излучения лазерного импульса 2 Дж, 7 Дж и 20 Дж максимальная степень ионизации составила Gd^{+21} , Gd^{+21} и Gd^{+25} , соответственно. Однако, несмотря на то, что при энергиях излучения 2 Дж и 7 Дж степень ионизации одинаковая, зарегистрировано относительное перераспределение интенсивностей пиков, что связано с перезарядкой ионов внутри плазмы, плотность которой возрастает с повышением энергии воздействующего лазерного излучения.

В случае мишеней из алюминия и гадолиния при близких значениях энергии лазерного импульса 1 Дж и 2 Дж, соответственно, обнаружены отличия в эмиссии ионов. В

частности, в эксперименте с алюминием энергия ионов не превышает 5 кэВ, а в случае с гадолинием зарегистрированы ионы с энергиями до 105 кэВ, что связано с более горячей плазмой и столкновительными процессами внутри неё для случая мишени из гадолиния. Следует отметить, что для полного представления характера пространственного распределения ионного состава плазмы планируется проведение аналогичных исследований при разных углах наблюдения.

Авторы выражают благодарность Зукакишвили Гиви Георгиевичу за ценные советы при обработке и обсуждении результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-02-00293).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. Г. Басов, Ю. А. Захаренков, А. А. Рупасов и др., *Диагностика плотной плазмы* (М., Наука, 1989).
- [2] О. Б. Ананьин, Ю. В. Афанасьев, Ю. А. Быковский, О. Н. Крохин, *Лазерная плазма. Физика и применения* (М., МИФИ, 2003).
- [3] E. Woryna, P. Parys, J. Wolowski, and W. Mroz, *Laser and Particle Beams* **14**, 293 (1996).
- [4] R. A. Ganeev, *Plasma Harmonics* (Singapore, Pan Stanford Publishing, 2014).
- [5] S. I. Fedotov, L. P. Feoktistov, M. V. Osipov, A. N. Starodub, *J. Russian Laser Research* **25**, 79 (2004).

По материалам VII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 11 июля 2018 г.