

Исследование энергетических спектров многозарядных ионов Ti из лазерной плазмы

А.В.Кильпио, Н.Г.Киселев, П.П.Пашинин, И.В.Рудской,
Б.Ю.Шарков, Е.В.Шашков, А.В.Шумшуров

Представлены экспериментальные результаты по генерации и исследованию высокозарядных ионов Ti из лазерной плазмы, создаваемой излучением второй гармоники неодимового лазера (энергия не более 14 Дж, длительность импульса 2.5 нс). Электростатическим энерго-масс-анализатором зарегистрирована группа ионов с зарядностью от +16 до +20, а коллектором измерен ионный ток этой группы, который составил $\sim 1 \text{ мА/см}^2$ при длительности ионного импульса $\sim 0.8 \text{ мкс}$.

Ключевые слова: лазерная плазма, высокозарядные ионы, инжектор ионов, энергетический спектр, ионный ток.

Интенсивное развитие ускорительной техники в последнее десятилетие открыло перспективу использования пучков заряженных частиц в инерциальном термоядерном синтезе. В существующих проектах для этой цели предполагается использовать как легкие ионы (ядра дейтерия, ионы углерода), так и многозарядные ионы тяжелых элементов (от ксенона до урана). Для заполнения накопительных колец ускорителей тяжелых ионов особый интерес представляет создание источника многозарядных ионов (инжектора) из лазерной плазмы, возбуждаемой излучением с различными длинами волн (от 0.3 до 10 мкм) и плотностями мощности облучения мишени (от 10^{12} до 10^{16} Вт/см^2) [1–3]. В связи с этим необходимо было провести эксперименты по оптимизации преобразования энергии лазерного излучения в энергию многозарядных ионов, т. е. изучить зависимость их энергетических спектров от потока лазерного излучения на мишени, измерить плотность тока и длительность импульса многозарядных ионов, а также осуществить расчетно-теоретические исследования лазерной плазмы на стадии разлета, определяющие зарядовый состав плазмы при воздействии лазерного излучения на мишень.

В данной работе исследовалась возможность генерации многозарядных ионов из лазерной плазмы Ti-мишени. Выбор материала мишени определялся параметрами ускорителя, в котором отношение заряда ионов к их массе (Z/A) должно лежать в интервале 0.25–0.35, т. е. зарядность ионов Ti должна быть порядка +20 [4]. Для получения таких ионов необходимо нагреть плазму до температуры $\sim 1.5 \text{ кэВ}$ (при условии, что основным меха-

низмом поглощения излучения является обратнотормозной механизм).

Существенные затруднения в подобных экспериментах возникают при измерении абсолютного числа ионов в плазме. В частности, сложной оказывается калибровка как вторичного электронного умножителя (ВЭУ) по сорту ионов и их энергии, так и ионного коллектора по определению абсолютного значения коэффициента вторичной эмиссии электронов с поверхности пластины для каждого сорта ионов в зависимости от энергии [5].

Для преодоления этих проблем в настоящей работе был рассчитан коллектор, в котором происходит «разрыв» плазмы с последующей регистрацией ионного тока и запирианием потока вторичных электронов. Напряженность и потенциал электрического поля на оси коллектора, вычисленные при напряжении на высоковольтном электроде –3000 В, приведены на рис. 1. Поперечный разрез коллектора ионов схематически представлен на рис. 2. При расчете учитывались объемный заряд пучка ионов, экстрагированных из плазмы, и энергия ионов в разлетающейся лазерной плазме.

Для получения высокотемпературной плазмы использовалась мощная одноканальная лазерная установка на фосфатном неодимовом стекле «Камертон» (ИОФ РАН). Установка позволяет получать на основной длине волны 1.055 мкм лазерные импульсы длительностью 2.5 нс с энергией W до 100 Дж при диаметре пучка 72 мм и

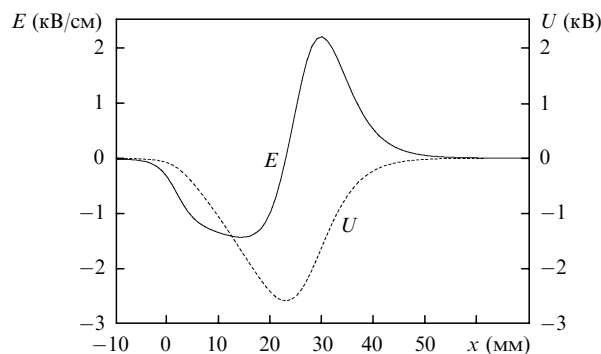


Рис. 1. Напряженность E и потенциал электрического поля U , вычисленные на оси коллектора.

А.В.Кильпио, П.П.Пашинин, Е.В.Шашков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kilpio@kapella.gpi.ru, pashinin@kapella.gpi.ru, shashkov@kapella.gpi.ru

Н.Г.Киселев. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Троицк, Московская обл.

И.В.Рудской, Б.Ю.Шарков, А.В.Шумшуров. ГНЦ РФ – Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова, Россия, 117218 Москва, ул. Большая Черемушская, 25; e-mail: Igor.Roudskoi@itep.ru, Boris.Sharkov@itep.ru, Alexander.Shumshurov@itep.ru

Поступила в редакцию 20 апреля 2005 г.

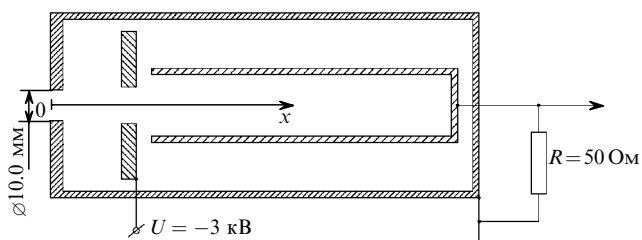


Рис.2. Схема коллектора ионов (поперечный разрез).

преобразовывать излучение в импульсы второй гармоники с $W \sim 50$ Дж [6].

Одной из особенностей образования лазерной плазмы в вакууме является сильная угловая зависимость разлета ионов от заряда. Чем выше заряд ионов, тем меньше телесный угол, в который разлетаются ионы. Поэтому была выбрана осесимметричная схема облучения и разлета плазмы. Излучение второй гармоники лазера фокусировалось на поверхность мишени сферическим зеркалом с отверстием в центре, чтобы дать возможность ионам свободно разлетаться вдоль оси установки. Анализ разлетающейся плазмы по энергии и зарядовым состояниям ионов осуществлялся по времяпролетной методике с помощью электростатического анализатора цилиндрического типа. Анализатор располагался на расстоянии около 320 см от поверхности мишени. Регистрация ионов за анализатором осуществлялась вторичным электронным умножителем ВЭУ-1 с последующим выводом тока на цифровой запоминающий осциллограф TDS-740 фирмы Tektronix с входным сопротивлением 50 Ом. Для измерения полного тока ионов использовался цилиндр Фарадея с напряжением до -3 кВ на отрицательном электроде, который служит для разрыва плазмы и препятствует поступлению вторичных электронов с коллектора (рис.2). Схема эксперимента представлена на рис. 3.

Плотность потока лазерного излучения на поверхности мишени определялась при измерении распределения интенсивности второй гармоники излучения лазера в фокальной плоскости. Измерения проводились с помощью микроскопа и ПЗС-матрицы. Диаметр d пятна рассеяния в фокусе на поверхности мишени составил ~ 10 мкм (рис.4). Отличие данного распределения от гауссова обусловлено отверстием диаметром 25 мм в центре сферического фокусирующего зеркала. Плотность мощности из-

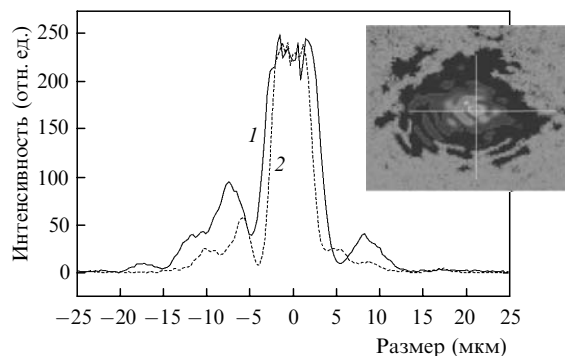


Рис.4. Диаметр пятна рассеяния в фокусе на поверхности мишени в горизонтальной (1) и вертикальной (2) плоскостях; на врезке – пятно рассеяния в фокусе на поверхности мишени.

лучения на поверхности мишени при энергии 20 Дж и длине волны $0,527$ мкм достигала 6×10^{15} Вт/см².

Температура лазерной плазмы и, следовательно, зарядность образующихся ионов зависят, главным образом, от плотности потока излучения на поверхности мишени. Для выяснения этой зависимости была выбрана энергия лазерного излучения, составляющая 3, 6,5 и 14 Дж. В ходе экспериментов исследовались энергетические спектры ионов Тi. Ионный сигнал с электростатического анализатора, измеренный при энергии лазерного импульса 3 Дж и ускоряющем потенциале 2000 В, представлен на рис.5. Видно, что большинство ионов имеют заряд от $+15$ до $+19$.

При известных параметрах лазерного излучения в фокальной плоскости был проведен теоретический расчет зарядового состава и энергетического распределения ионов Тi на расстоянии от мишени, равном расстоянию до регистрирующей аппаратуры (рис.6). Расчеты проводились по двухтемпературной гидродинамической модели с учетом ионизации остаточного вакуума рентгеновским и ультрафиолетовым излучением плазмы. В расчете полная энергия лазерного импульса делилась на две половины. Одна половина энергии содержалась в центральном пятне диаметром 10 мкм, вторая – во всей остальной части. Огибающая кривая является суммой токов ионов всех зарядностей в предположении, что коэффициент вторичной эмиссии слабо зависит от заряда ионов. Сравнение коллекторного тока, измеренного на расстоянии 320 см от мишени, с расчетным значением (рис.7) позволяет

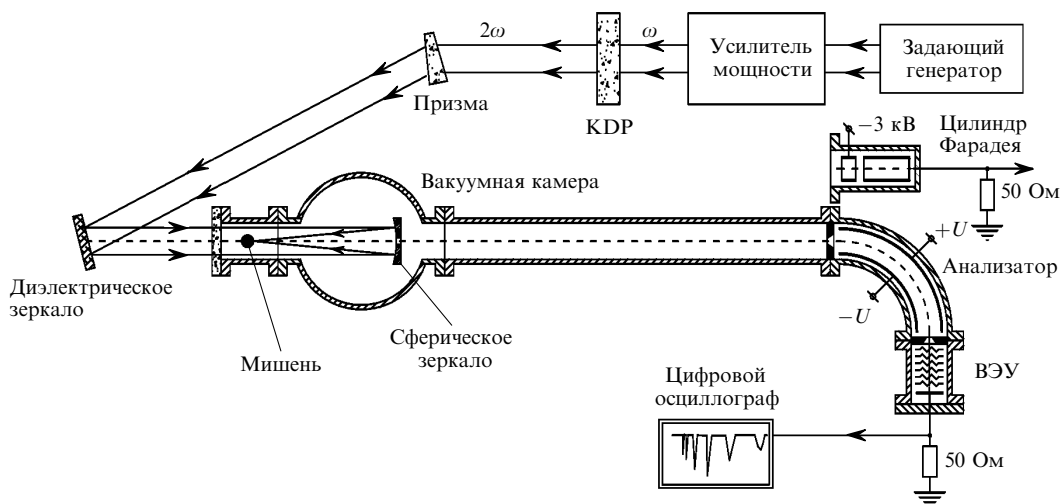


Рис.3. Схема эксперимента.

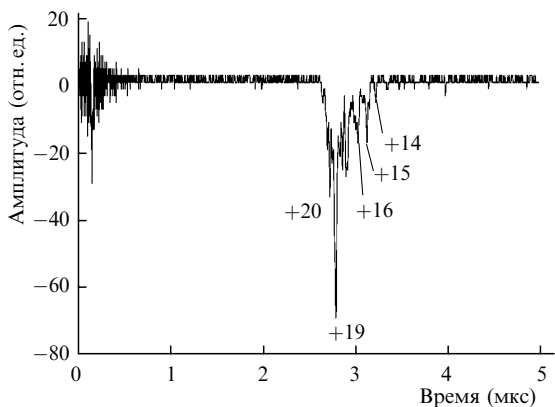


Рис.5. Ионный сигнал с электростатического анализатора при энергии лазерного импульса 3 Дж и ускоряющем потенциале 2000 В.

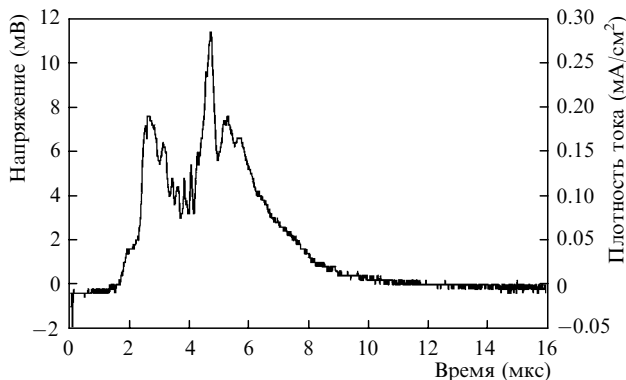


Рис.8. Коллекторный сигнал ионного тока.

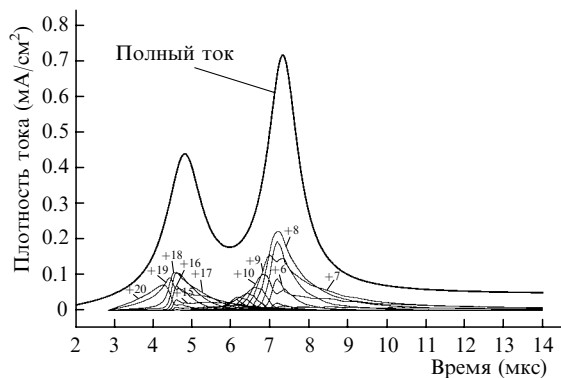


Рис.6. Теоретический расчет зарядового состава и энергетического распределения ионов Тi.

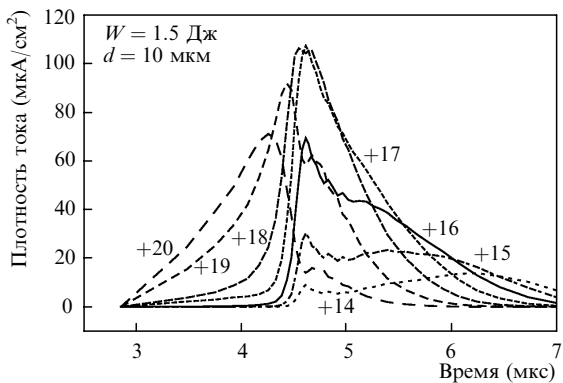


Рис.7. Сравнение коллекторного тока, измеренного на расстоянии 320 см от мишени, с расчетным значением.

сделать вывод о возможности достаточно хорошего предсказания плотности тока ионов на больших расстояниях от мишени. Коллекторный сигнал ионного тока плазмы представлен на рис.8.

По измеренным сигналам с электростатического анализатора были построены распределения по энергии (энергетические спектры) ионов Тi разной зарядности при различных энергиях лазерного излучения. Например, на рис.9 представлены энергетические спектры ионов Тi при $W = 14$ Дж. Видно, что анализируемая плазма состоит, в основном, из ионов с зарядностью от +16 до +20, т.е. наблюдается довольно узкий энергетический спектр, а полная плотность тока группы высокозарядных ионов составляет примерно 1 мА/см^2 при длительности ионного импульса $\sim 0.8 \text{ мкс}$ (число ионов $\sim 10^9$, апертура пучка ионов $\sim 5 \text{ см}$).

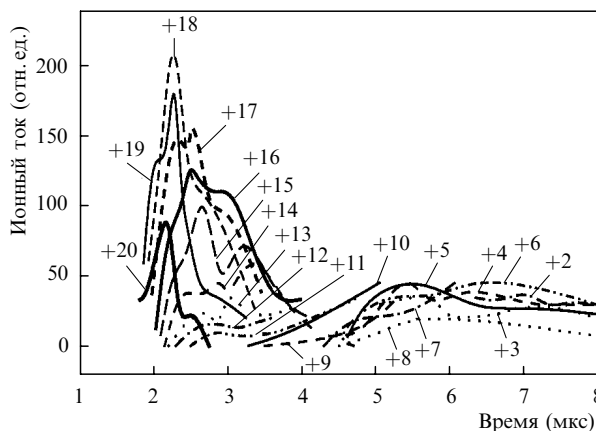


Рис.9. Энергетические спектры ионов Тi при $W = 14$ Дж.

Из полученных результатов также следует, что в плазме, созданной излучением второй гармоники Nd-лазера, могут генерироваться He-подобные ионы Тi, способные распространяться на большие расстояния от мишени с сохранением зарядности. Токи, создаваемые этими ионами, имеют значения, близкие к требуемым от ионного инжектора. В перспективе создание лазерного инжектора частиц, работающего с частотой 1 Гц и обеспечивающего получение ионных токов с плотностью в несколько мА/см^2 и зарядностью +3 – +5, вполне возможно при использовании современных твердотельных лазеров.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 03-02-17549) и Научной школы (грант НШ-1919.2003.2).

1. Laska L., Jungwirth K., Kralikova B., Krasa J., Pfeifer M., Rohlena K., Skala J., Ulschmied J., Badziak J., Parys P., Wolowski J., Woryna E., Gamino S., Torrisi L., Boody F., Hora H. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **45**, 585 (2003).
2. Gammno S., Torrisi L., Ciavola G., Ando L., Wolowski J., Laska L., Krasa J., Picciotto A. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **209**, 345 (2003).
3. Satov Yu., Sharkov B., Haseroth H., Smakovski Yu., Makarov K., Kondrashev S., Roerich V., Stepanov A., Kugler H., Scrivens R., Camut O., Shumshurov A., Balabaev A., Charushin A. *J. Rus. Las. Res.*, **25** (3), 205 (2004).
4. Koshkarev D.G., Sharkov B.Yu., Alexeev N.N. Project ИТЕР-TWAC. GSI-97-08 Annual report.
5. Woryna E., Parys P., Wolowski J., Krasa J., Laska L., Rohlena K., Stockli M.P., Winecki S., Walch B. *Rev. Sci. Instr.*, **69** (2), 1045 (1998).
6. Кильпио А.В., Кочиев Д.Г., Малютин А.А., Пашинин П.П., Сучков Ю.А., Шашков Е.В. *Труды ИОФАН*, **36** 202 (1992).