

## Экспериментальное исследование ускорения протонов из тонких фольг, облучаемых ультраинтенсивным высококонтрастным лазерным импульсом

К. В. Сафронов, Д. А. Вихляев, А. Г. Владимиров, Д. С. Гаврилов, С. А. Горохов, А. Г. Какшин, Е. А. Лобода, В. А. Лыков, Е. С. Мокичева, А. В. Потапов, В. А. Пронин, В. Н. Сапрыкин, П. А. Толстоухов, О. В. Чефонов, М. Н. Чижков

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики  
456770, Снежинск Челябинская область, Россия<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 10 октября 2008 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований ускорения протонов с обратной поверхности мишеней, облучаемых лазерными импульсами установки СОКОЛ-П с интенсивностью до  $2\text{фот}10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>. Ускорение протонов тем эффективнее, чем меньше толщина мишени, однако предимпульс усиленного спонтанного излучения (УСИ) разрушает тонкие мишени до прихода основного импульса. Для проведения экспериментов с ультратонкими мишенями в усилительный тракт был установлен дополнительный оптический затвор на основе ячейки Поккельса, в результате энергетический контраст по отношению к предимпульсу УСИ был увеличен до  $4 \cdot 10^6$ . Высокий контраст позволил провести эксперименты по исследованию ускорения протонов из мишеней с толщинами менее 100 нм.

PACS: 29.30.Er, 52.38.Kd

**Введение.** Пучки протонов и ионов мегаэлектронвольтных энергий, генерируемые на обратной поверхности твердотельных мишеней, облучаемых мощными ультракороткими лазерными импульсами, вызывают повышенный интерес в научных кругах в последнее время. Предложено большое количество практических приложений источников этих пучков: протонная терапия раковых опухолей [1], производство короткоживущих изотопов для ПЭТ [2], зондирование плотной плазмы [3], “быстрое зажигание” термоядерных мишеней в концепции инерциального термоядерного синтеза [4] и т. п. Однако для реализации этих приложений необходимо провести большую работу по повышению коэффициента конверсии лазерной энергии в быстрые протоны и увеличению энергии протонов в пучке.

В настоящее время общеизвестно, что быстрые протоны и ионы ускоряются на обратной стороне твердотельной мишени за счет электростатического поля “горячих” электронов, проходящих сквозь мишень так называемого механизма ускорения по нормали к мишени в дебаевском слое (TNSA) [5]. Одним из факторов, влияющих на ускоряющее поле, является толщина мишени. Чем тоньше мишень, тем меньше рассеяние “горячих” электронов внутри мишени, а следовательно, выше их концентрация на обратной

поверхности. Кроме того, при снижении толщины уменьшается “возвратный ток” электронов из периферии мишени, компенсирующий ускоряющее поле “горячих” электронов. Рециркуляция электронов в тонкой мишени в течение лазерного импульса также может увеличить ускоряющее поле. Однако наличие предимпульса усиленного спонтанного излучения (УСИ) является ограничивающим фактором, не позволяющим проводить эксперименты с мишенями тоньше определенной толщины. УСИ может существенно нагревать и даже прожигать насквозь тонкую мишень до прихода основного импульса. Снижение градиента плотности вещества на обратной поверхности сразу же понижает эффективность механизма TNSA.

Исходя из вышесказанного, целью нашей работы было исследование зависимости выхода быстрых протонов от толщины мишени.

**Лазерная установка.** Эксперименты были проведены на 10-терраваттной пикосекундной установке на фосфатном неодимовом стекле СОКОЛ-П [6]. Установка обеспечивает генерацию лазерных импульсов с энергией до 10 Дж длительностью 0.8–1 пс, которые фокусируются на мишень внеосевым параболическим зеркалом. Интенсивность лазерных импульсов на мишени составляет величину  $\sim 1 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для уменьшения влияния УСИ в усилительный тракт установки СОКОЛ-П был установлен дополнитель-

<sup>1)</sup> Факс: 8(35146)51101, e-mail: dep5@vniitf.ru

ный элемент – оптический затвор на основе ячейки Погкельса, который обеспечивал снижение плотности энергии трехсотмикросекундного импульса суперлюминесценции на мишени в 160 раз. Установка затвора позволила увеличить энергетический контраст до величины  $\sim 4 \cdot 10^6$ .

**Диагностические методики.** Для измерения энергетического распределения быстрых ионов использовался времяпролетный спектрометр на базе кремниевого полупроводникового детектора СППД11-04 (рис.1а). Временное разрешение СППД11-

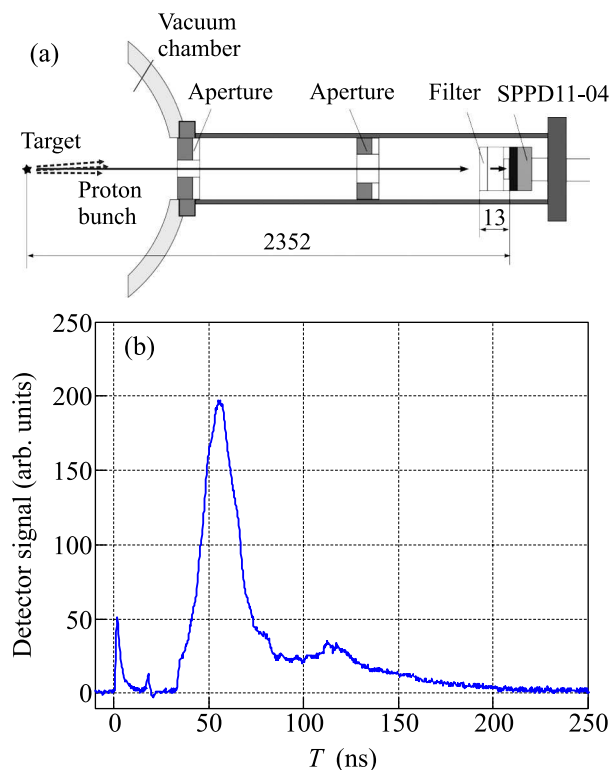


Рис.1. (а) Схема времяпролетного полупроводникового спектрометра и (б) осциллограмма сигнала полупроводникового детектора, полученная в опыте 120407. Первый пик соответствует приходу рентгеновского излучения на детектор, пик большой амплитуды, начинающийся на 35 нс соответствует приходу ускоренных ионов на детектор

04 составляет 1.5 нс, толщина чувствительного слоя кремния  $\sim 80$  мкм, что соответствует полному пробегу протонов с энергией 2.8 МэВ. Регистрация сигнала детектора осуществлялась цифровым осциллографом Tektronix TDS3034. На рис.1б приведен сигнал, полученный в одном из опытов.

Для изучения спектрально-углового распределения быстрых протонов был разработан времяпролетный сцинтилляционный спектрометр. Его конструкция схематично показана на рис.2а. Принцип

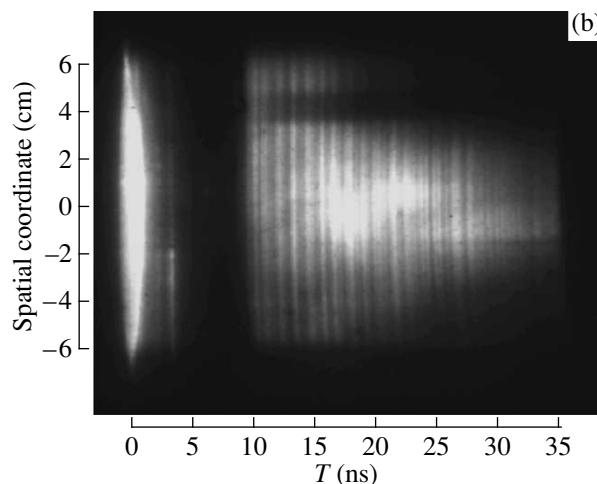
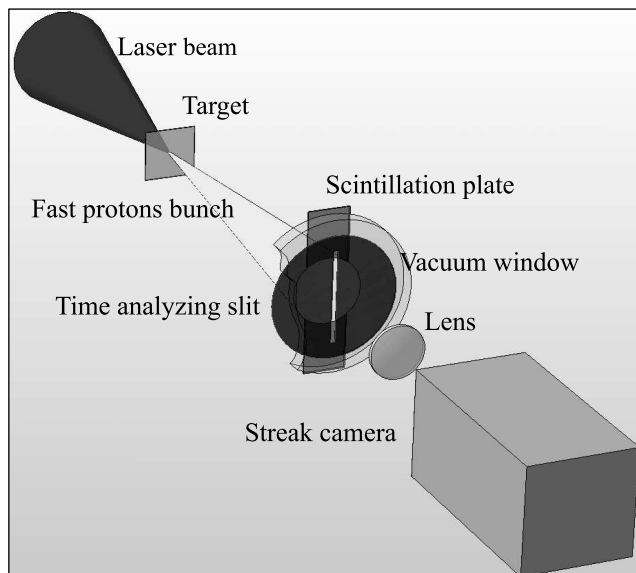


Рис.2. (а) Схема времяпролетного сцинтилляционного спектрометра и (б) характерное изображение, полученное спектрометром в одном из опытов

работы спектрометра состоит в следующем. Ионы из мишени попадают на тонкую пластину быстропластмассового сцинтиллятора, приклеенного на стеклянное окно вакуумной камеры. С обратной стороны окна размещается непрозрачный экран с прорезанной в нем прямоугольной щелью. Изображение щели объективом передается на фотокатод быстрого оптического хронографического регистратора СФЭР6 (временное разрешение  $< 0.3$  нс), который осуществляет его временную развертку. Изображение с экрана СФЭР6 регистрируется 14-битной П.З.С.-камерой СПМ16. В качестве детектора в экспериментах использовался быстрый пластмассовый сцинтиллятор ВС-422Q миллиметровой толщины. Конверсионная эффективность ВС-422Q 0.76%, длительность сцин-

тилляционной вспышки 0.36 нс. На рис.2b представлено характерное изображение свечения сцинтиллятора, полученное в одном из опытов.

### Постановка экспериментов и результаты.

Схема постановки методик представлена на рис.3. Полупроводниковый спектрометр располагался на

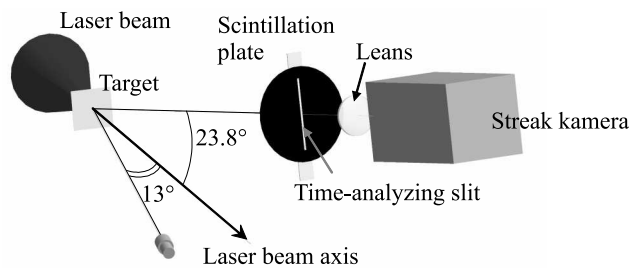


Рис.3. Схема постановки диагностических методик

расстоянии 235.2 см от мишени под углом  $13^\circ$  к оси лазерного импульса. Сцинтилляционный детектор располагался под углом  $23.8^\circ$  к оси лазерного импульса. Сцинтилляционная пластина высотой 15 см была размещена на расстоянии 33.2 см от мишени. Таким образом, полный угол обзора методики составил  $25.5^\circ$ .

Основной целью экспериментов было изучение зависимости выхода быстрых ионов от толщины облучаемой мишени. Для этой цели были изготовлены алюминиевые мишени с толщинами  $0.2 \div 5$  мкм, а также двухслойные мишени из 55 нм поликарбоната с напыленным на него слоем алюминия 30–40 нм (мишени облучались со стороны алюминия). В экспериментах мишень располагалась таким образом, что ее нормаль совпадала с осью лазерного импульса.

Выход ионов в единицу телесного угла измерялся полупроводниковым спектрометром и определялся как полная энергия попавших в детектор частиц, отнесенная к телесному углу, занимаемому детектором. По результатам измерений построена зависимость выхода ионов от толщины мишени (см. рис.4). График показывает, что выход ионов быстро растет с уменьшением толщины мишени. В ходе экспериментов было обнаружено, что при малых толщинах мишеней ( $< 0.2$  мкм) большое влияние на выход быстрых частиц оказывает качество поверхности мишени. Так, визуальные наблюдения показали наличие крупных шероховатостей на поверхностях некоторых мишеней толщиной 0.2 мкм, выход ионов из таких мишеней оказался существенно ниже, чем из мишеней с хорошим качеством поверхности (см. 2 точки в овале на рис.4a). Измерения максимальной энергии быстрых протонов показали, что эта величина практически не зависит от толщины мишени и составляет

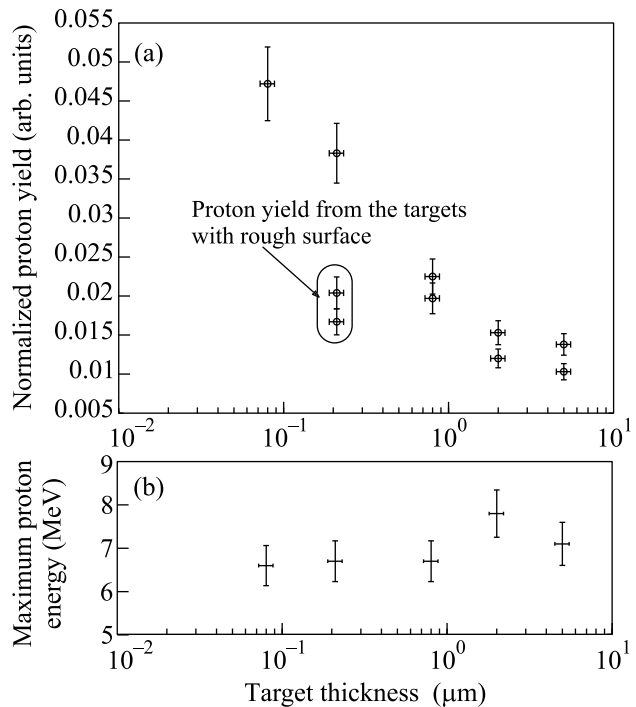


Рис.4. (a) Зависимость выхода быстрых ионов от толщины мишени. По оси ординат – энергия ионного пучка в единицу телесного угла, нормированная на энергию лазерного импульса. (b) Зависимость максимальной энергии быстрых ионов от толщины мишени

$\sim 7$  МэВ при номинальной энергии лазерного импульса  $E_{\text{las}} = 6.5$  Дж.

Для исследования углового распределения протонных пучков мишень была повернута так, чтобы ее нормаль смотрела на сцинтилляционный спектрометр. В части экспериментов с мишенями толщиной  $\sim 90$  нм в центре эпограммы протонного пучка наблюдался провал (см. рис.5). Кроме того, в этих экспериментах максимальная зарегистрированная энергия протонов была существенно ниже средней. Поскольку механизм TNSA ускорения протонов чрезвычайно чувствителен к состоянию обратной поверхности облучаемой мишени, мы предполагаем, что появление провала связано с прогревом тыльной поверхности фронтом лазерного импульса. Необходимо отметить, что провалы в центре протонного пучка наблюдались и другими исследовательскими лабораториями ранее, однако толщины мишеней в этих экспериментах были значительно больше и составляли несколько микрометров. Высокий контраст установки СОКОЛ-П позволил наблюдать устойчивую эмиссию из мишеней толщиной  $< 1$  мкм.

**Выводы.** Высокий контраст по отношению к предимпульсу УСИ позволил провести исследование

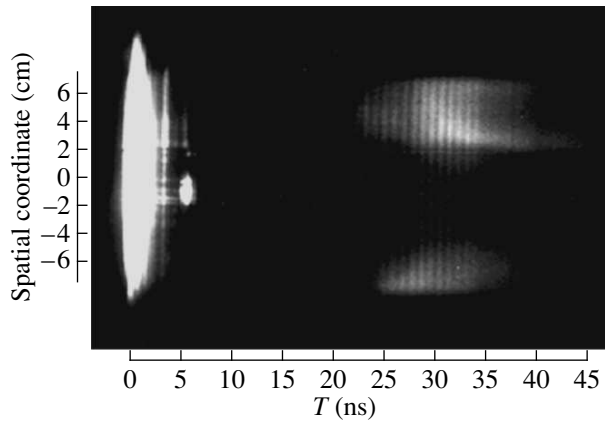


Рис. 5. Изображение протонного пучка из 90 нм мишени, развернутое во времени с помощью сцинтилляционного времяпролетного спектрометра. В центральной части пучка наблюдается провал

протонных пучков из лазерных мишеней субмикронной толщины. Эксперименты показали увеличе-

ние выхода быстрых протонов при снижении толщины мишени вплоть до  $\sim 90$  нм. Однако максимальная энергия протонов в пучке не зависит от толщины мишени, кроме того, обнаружено влияние качества поверхности мишени на параметры пучка ускоренных частиц.

- 
1. S. V. Bulanov and V. S. Khoroshkov, *Plasma Phys. Rep.* **28**, 453 (2002).
  2. K. W. D. Ledingham, P. McKenna, T. McCanny et al., *J. Phys. D* **37**, 2341 (2004).
  3. M. Borgesi, A. Mackinnon, A. Schiavi et al., 2000 RAL Central Laser Facility Annual Report 1999/2000.
  4. M. Tabak, J. Hammer, M. Glinsky et al., *Phys. Plasmas* **1**, 1626 (1994).
  5. S. C. Wilks, A. B. Langdon, T. E. Cowan et al., *Phys. Plasmas* **8**, #2, 542 (2001).
  6. D. A. Dmitrov, L. A. Fomichev, A. G. Kakshin et. al., *Proc. of XXVIII ECLIM "10-TW Picosecond Nd:glass Laser Facility "Sokol-P"*. (ISBN 84-690-2624-0), 2004.