

УДК 533.951

## ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЛЕГКОЙ ПРИМЕСИ ИЗ СВЕРХТОНКОЙ ФОЛЬГИ СЛОЖНОГО ИОННОГО СОСТАВА

И. А. Андрияш<sup>1</sup>, В. Ю. Быченков

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
119991, Москва, Ленинский проспект, 53

*Предложена модель ускорения частиц легкой примеси из плоской ультратонкой фольги сложного ионного состава под действием ультракороткого мощного лазерного импульса высокого контраста. Исследуется как режим чисто кулоновского ускорения ионов, характерный для случая экстремально высоких энергий электронов, так и ускорение ионов в условиях пространственного разделения зарядов, заданного конечной характерной температурой электронов. Сформулированы точные и приближенные аналитические подходы для описания ускорения частиц примеси. Получены пространственные и спектральные характеристики ускоренных частиц и исследована их динамика, как в приближении пробных частиц примеси, так и с учетом их собственного электростатического поля в зависимости от относительной плотности заряда легких частиц.*

**Ключевые слова:** лазерное ускорение ионов, сверхмощные лазерные импульсы.

Для существующих сверхмощных фемтосекундных лазерных систем уже достигнуты интенсивности вплоть до  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup> [1]. Такие установки открывают перспективы как для многочисленных фундаментальных исследований, так и для реализации практических приложений, в частности, лазерного ускорения частиц. Ультракороткие мощные

<sup>1</sup>e-mail:iandr@sci.lebedev.ru

импульсы высокого контраста способны практически мгновенно ионизовать фольгу и частично или полностью удалить электроны из неё, что обусловит генерацию сильных полей разделения заряда, способных ускорять ионы мишени до высоких энергий. Для ряда практических приложений лазерного ускорения ионов, таких как адронная терапия, помимо величины энергии ускоренных частиц очень важным оказывается получение моноэнергетичных (квазимоноэнергетичных) ионных пучков. В последних работах, посвященных лазерному ускорению ионов из твердотельных мишеней, особенно интенсивно обсуждается случай, когда мишень включает в себя ионы разных сортов – легкие и тяжелые [2, 3]. При движении в поле тяжелых частиц ускорение легких ионов может сформировать практически моноэнергетический пучок.

На основе решения уравнения Пуассона для системы неподвижных ионов фольги и электронов конечной температуры, распределенных в пространстве по закону Больцмана  $n_e = n_{e0} \exp(e\Phi(x)/T_e)$ , можно найти как неявный вид точного решения для произвольной температуры, так и приближенные выражения для не слишком малых электронных температур  $(2\lambda_{De}/L)^2 > 1$ :

$$E(x) = \begin{cases} x\sqrt{2T_0 e^{-1/\xi}/\xi}, & x \leq 1 \\ (2T_0/\xi) \left( x - 1 + \sqrt{2T_0 e^{1/\xi}} \right)^{-1}, & x > 1. \end{cases} \quad (1)$$

Расстояния измеряются в единицах половины толщины фольги  $L$ , параметр  $T_0 = (2\lambda_{De}/L)^2$  однозначно связан с электронной температурой, а величина  $\xi$  определяется условием полной нейтральности системы  $n_1 Z_1 = n_{e0} \xi$ , где  $n_1$  и  $Z_1$  – плотность и заряд тяжёлых ионов соответственно. В пределе высоких температур, когда радиус Дебая электронов  $\lambda_{De}$  существенно превосходит характерный размер мишени, поле имеет вид однородного поля бесконечной заряженной плоскости  $E(x) = \{x, x < 1; 1, x \geq 1\}$ . Применимость такого подхода ограничивается условиями применимости одномерной модели, которое нарушается на расстояниях, сравнимых с поперечным размером заряженной области, то есть с радиусом пятна фокусировки лазерного излучения  $R$ . При удалении частиц на расстояние  $\geq R$  поле убывает с расстоянием обратно квадратично, а ускорение становится трехмерным, что существенно снижает его эффективность.

В рамках гидродинамического подхода описан разлет легких ионов примеси из неподвижной фольги под действием как однородного поля, так и поля разделения заряда (1). Спектральные распределения ионов по энергии приведены на рис. 1.

Также проведен качественный учет разлета вылетевшей примеси под действием собственного кулоновского поля легких частиц с относительной плотностью заряда

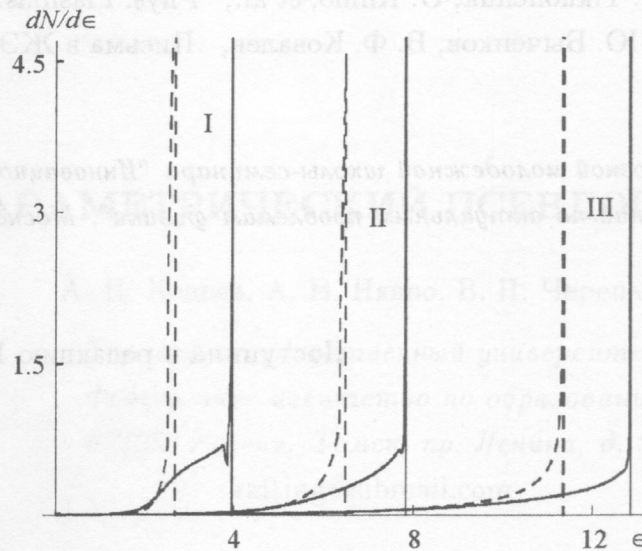


Рис. 1. Энергетический спектр ионов примеси, ускоренной на длине  $x = R = 20$ , для значений параметра  $\eta = 0.5$  (I), 5 (II), 20 (III). Пунктиром показаны спектры, полученные в приближении пробных частиц.

$\eta = n_0 Z / n_1 Z_1$ . Здесь  $n_0$  и  $Z$  – начальная плотность и заряд легких ионов. Ускоряясь в электростатическом поле фольги, примесь формирует на фронте движения плотный слой, характеризуемый узким разбросом по энергии. На основе развитой модели можно показать, что частицы набирают основную долю энергии на длине  $x_1 \approx 2\lambda_{De}$ , а максимальная энергия приближенно определяется выражением:

$$E_R \cong \frac{2T_0}{\xi} \ln \left( 1 + R - 1/\sqrt{2T_0 \exp(1/\xi)} \right). \quad (2)$$

Поскольку собственное поле примеси может привести к разлету получаемого пучка, сравнивая энергию (2) с энергией собственного кулоновского поля пучка примеси  $E_{self} = \eta R$ , можно качественно сформулировать условие моноэнергетичности получаемых частиц. Приближенно это условие имеет вид  $T_0 > R^{2\sqrt{2\eta}+1} e^{16\eta-5.8}$ .

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность лазерного ускорения пучков легких ионов из тонких фольг и качественно описаны условия квазимоноэнергетичности получаемых частиц.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. A. Mourou, T. Tajima, and S. V. Bulanov, Rev. Modern Phys. **78**, 309 (2006).

[2] A. V. Brantov, V. T. Tikhonchuk, O. Klimo, et al., Phys. Plasmas. **13**, 122705 (2006).

[3] И. А. Андрияш, В. Ю. Быченков, В. Ф. Ковалев, Письма в ЖЭТФ **87**, 720 (2008).

По материалам 3 Всесоюзной молодежной школы-семинара "Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики", Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 16 октября 2009 г.