

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Комментарии к статье "Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом"

П.Е. Беленсов

PACS numbers: 41.75.Ak, 52.40.Mj

Статья А.Е. Дубинова, И.Ю. Корниловой и В.Д. Селемира (УФН 172 1225 (2002)) содержит современное исследование интересного явления, связанного с генерацией быстрых ионов на основе сильноточных электронных пучков. Этот эффект был открыт почти сорок лет назад и, будучи многократно воспроизведенным, имеет хорошие перспективы для разнообразных применений. Статья содержит полезную информацию по современным исследованиям данной проблемы, однако некоторые выводы относительно механизма коллективного ускорения ионов не являются общепринятыми. Кроме того, вызывает возражения интерпретация некоторых экспериментов. Поэтому далее я хотел бы изложить свою точку зрения на спорные вопросы проблемы генерации быстрых ионов на основе сильноточных электронных пучков.

Аномально быстрые ионы эпизодически регистрировались в различных плазменно-пучковых системах начиная примерно с 30-х годов прошлого столетия. Для объяснения наблюдаемого явления в более поздний период предлагались различные физические механизмы: перегрев плазмы, ускорение ионов ионно-звуковыми волнами, электронами при расширении плазмы в вакуум из-за наличия у физических установок внешних электрических цепей, представляющих электрические контуры, и многие другие. Отсутствие воспроизводимости результатов и достоверных данных ограничивало возможность однозначной интерпретации наблюдаемого физического явления. После публикации в 1967 году пионерской экспериментальной работы [1] по ускорению ионов в электронных пучках, результаты которой неоднократно воспроизводились и подтвердились большинством научных центров мира, появилось множество теоретических моделей, не давших до настоящего времени выхода в новую ускорительную технику с применением коллективных полей. Несмотря на большой интервал времени со дня выхода работы [1], нет четкой концепции физического механизма ускорения ионов в электронных пучках. В погоне за сенсационными резуль-

татами остались незамеченными многие непонятные и, на первый взгляд, "незначительные" экспериментальные факты. На некоторые из них, имеющие значение для понимания механизма ускорения ионов в системах без заполнения нейтральным газом, и некоторые неточности, содержащиеся в рассматриваемой статье (ниже всюду именуемой "статьей") обращено внимание настоящими "Комментариями".

В статье для объяснения механизма ускорения ионов в электронном пучке авторы используют концепцию виртуального катода. Однако другая группа авторов (Адлер и др., см. с. 1238 и 1239 статьи), основываясь на результатах экспериментов, трижды меняет свои представления о механизме ускорения ионов: отказавшись от концепции ускорения ионов в стационарной потенциальной яме, они склоняются к концепции ускорения ионов фронтом электронного пучка, а позже приходят к выводу о вероятном ускорении ионов при развитии двухпучковой электронно-ионной неустойчивости. Неуверенность выбора концепции ускорительного процесса вызвана отсутствием некоторых достоверных экспериментальных данных, строгой теоретической модели физического явления и ряда других причин, имеющих принципиально важное значение для адекватной интерпретации экспериментальных результатов. Остановимся на некоторых из этих причин. Так, на с. 1241 статьи (левая колонка, 27-я строка снизу) утверждается, что согласно результатам проведенной серии исследований в искровом вакуумном разряде [2–4] "максимальная энергия ионов пропорциональна кратности их заряда". Это утверждение ошибочно, поскольку в работе [3] (с. 420, правая колонка, 11-я строка снизу) читаем: "Из масс-спектрограмм следует, что максимальные энергии тяжелых ионов не зависят от кратности их заряда". Независимость максимальной энергии ускоренных ионов равных масс от кратности их заряда отмечается и в другой цитируемой в статье работе [1] на с. 540 (9-я строка снизу): "Максимальная энергия не зависит от кратности заряда". То есть максимальные скорости ионов равных масс не зависят от кратности их заряда. Независимость максимальных скоростей ускоренных ионов от кратности их заряда отмечается и другими авторами. Например, в работе [5] отмечается, что часто в масс-спектрографических исследованиях наблюдаются одинаковые максимальные скорости различных ионов, добавим: независимо от кратности заряда и их массы, что следует из [5, рис. 3b].

П.Е. Беленсов. Сухумский физико-технический институт
350062 г. Краснодар, ул. Герцена 176
Тел. (8612) 26-02-51

Статья поступила 22 июля 2003 г.,
после доработки 29 октября 2003 г.

Независимость максимальных скоростей ускоренных ионов от величины заряда, имеющая важное значение для понимания физического явления, отражает характерную особенность (аномальность) коллективного ускорения ионов в электронных пучках. В идеальном случае (достаточно мощной энергетике) при аномальном ускорении ионов в электронных пучках максимальные скорости разных ионов равны независимо от их массы и кратности заряда. Это подтверждают также результаты экспериментов, при которых ионы с большими массами m_n обладают большими энергиями $W_{n \max}$, чем ионы меньших масс $W_{i \max}$, например, [1, 3, 5]. То есть

$$W_{n \max} \leq \frac{m_n}{m_i} W_{i \max} \quad (m_n > m_i).$$

Знак неравенства соответствует случаю неидеальных условий ускорительного процесса. Перечисленные особенности проявляются не только при определенном отношении тока электронного пучка к предельному току $I_e/I_{e \text{пр}} > 1$ в искровых или других сильноточных электронно-пучковых системах, но и в слаботочных системах стационарного разряда [1, с. 540, 7-я строка снизу]. Слаботочные системы позволили в контролируемых условиях выявить, кроме отмеченных особенностей, ряд других характеристик ускорительного процесса [6]. Например, в работе [6] показано, что наибольшее значение коэффициента аномального ускорения, определяемого как отношение максимальной энергии ускоренных ионов $W_{i \max}$ к энергии электронов пучка $W_e \approx eU_0$ ($k_i = W_{i \max}/W_e$), достигается в области малых электронных токов $I_e \leq 1$ А и низких ускоряющих напряжений $U_0 \leq 1$ кВ при независимом источнике плазмы. Обратим внимание на то, что при независимом источнике плазмы аномальное ускорение ионов в электронном пучке имеет место во всем интервале неустойчивых состояний электронного пучка, формируемого плазменным диодом [7] (при заданном среднем значении электронного тока \bar{I}_e он неустойчив в широком интервале напряжений φ на диоде $\varphi_a < \varphi < \varphi_b$, $\varphi_b/\varphi_a \geq 10^3$, где φ_a — порядка средней энергии ионов в плазме источника, φ_b определяется неоднородностью плазмы, величиной и геометрией отверстия эмиссии).

Известно [8], что условие $I_e/I_{e \text{пр}} > 1$ достаточно для возникновения виртуального катода при транспортировке электронного пучка, ограниченного в поперечном направлении продольным магнитным полем, но оно недостаточно для ускорения возникшей потенциальной ямы виртуального катода, захвата и удержания различных по массе и заряду ионов даже при глубокой ускоряющей потенциальной яме. Чтобы понять возможность наблюдаемого равенства максимальных скоростей различных по массе и заряду ионов и их большие токи, необходимо, чтобы ускорение поля виртуального катода происходило резонансно с устойчивым движением группы различных захваченных этим полем заряженных частиц. Поэтому, если концепция виртуального катода достаточно ясно описывает физику образования мощных импульсов положительных ионов в отражательных системах (диодах, триодах и т.д.), то справедливость использования этой концепции для объяснения аномально ускоренного мощного потока различных ионов в электронных пучках не очевидна.

В статье выделяется работа группы ученых Ливерморской лаборатории им. Лоуренса, руководимой

Дж. Люсом (J. Luce) [9], повторившей эксперимент Сухумского физико-технического института (СФТИ) 60-х годов на современных мощных физических установках типа Febatron и FX-75. Эта группа ученых считает, что произведенная ею модификация, состоящая в изоляции анода диода диэлектрической вставкой, внесла принципиальное изменение в диодную систему. Поэтому они выделили свою установку в особую структуру, определившую высокие результаты экспериментов. Рассмотрим данный вопрос более подробно.

В физических установках СФТИ плазма создавалась независимым источником и поступала в диод до подачи на него напряжения либо с задержкой во времени. Вследствие неустойчивости плазмы в электрическом поле диода [7] она сносилась в анодную область, откуда поступала в вакуумное дрейфовое пространство и рассеивалась на стенках физической установки, как и ионы, ускоренные электронным пучком. Таким образом, областью взаимодействия электронного пучка с плазмой в установках СФТИ являлись: диодный промежуток, анодная область и вакуумное дрейфовое пространство. В физических установках Ливерморской лаборатории наличие диэлектрической вставки в аноде диода позволило (под воздействием электронов и пробоя вставки) создавать анодную плазму из ионов материала вставки. Анодная плазма поступала в диодный промежуток и дрейфовое вакуумное пространство. Таким образом, областью взаимодействия электронного пучка с плазмой в установках Ливерморской лаборатории являлись: примыкающий к аноду диодный промежуток, анодная область и дрейфовое вакуумное пространство. Следовательно, условия взаимодействия электронного пучка с плазмой и ускорения ионов в экспериментах СФТИ и Ливермора принципиально не отличаются. Поэтому, несмотря на различие конструкций, физика ускорительного процесса в рассматриваемых двух случаях, по видимому, одинакова и выделять диод установок Ливерморской лаборатории в особую систему не следует.

Отличие конструкций физических установок определяет различие решения вопроса смены ускоряемых ионов. В физических установках СФТИ для смены ускоряемых ионов необходимо менять независимый источник плазмы и тем самым имеется возможность создавать пучки аномально ускоренных ионов практически всей периодической системы элементов таблицы Менделеева. Для смены ускоряемых ионов в установках лаборатории Ливермора необходимо менять состав твердого диэлектрика анодной вставки диода. При этом состав пучка аномально ускоренных ионов представляет смесь ионов материала диэлектрика анодной вставки [10]. Поэтому, если персонализировать диоды, как это делается в статье, то диод Люса Ливерморской лаборатории является ничем иным, как модификацией диода Плютто, использованного в СФТИ, по меньшей мере, шестью годами раньше [1].

Авторы статьи отмечают рекордно высокие энергии и большие токи ускоренных ионов, полученных на физических установках Ливермора, и относят их к особенностям используемого диода, называя его "диодом Люса". Обсудим данный вопрос.

В середине 1970–1980 годов СФТИ посетил сотрудник Ливерморской лаборатории господин Г. Сахлин (H. Sahlin) — соавтор работ Люса (автор настоящих "Комментариев" при этом отсутствовал). Из передан-

Таблица

| Место эксперимента | U_0 , МВ | I_e , кА | τ_u , нс | $k_i = W_{i \max}/W_e$ | v/γ | протон импульс | $W_{i \max}$, МэВ | W_{\max} , МэВ | Литература |
|--|--------------------|---------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------------|---|-----------------------------|----------------|
| СФТИ Ливермор- ская лабора- тория | 0,2–0,3 4 (2,5) | 0,2–1,0 30 | ≈ 100 30 | 10–100 ≈ 4 (7) | $\approx 0,05$ 0,3 | $10^{11} - 10^{12}$ $> 10^{14}$ | 5 (H ⁺) 15 (H ⁺) | 20 (C ^{+1,2,3,4}) | [1, 3] [10] |

ных господином Сахлиным сотрудникам СФТИ первой публикации их группы [10] и информации о полученных результатах можно заключить, что высокие энергии ускоренных ионов обеспечены в основном энергетическими возможностями физических установок. Так, когда на фебатроне с параметрами $U_0 = 2,1$ МВ, $I_e = 5$ кА, длительностью импульса тока $\tau_u = 50$ нс и параметром Лоусона (параметр Лоусона [11] в статье именуется параметром Будкера) $v/\gamma = 0,1$ выход ядерных реакций достиг насыщения, группа Люса перешла на более мощную физическую установку типа FX-75 с параметрами $U_0 = 4$ МВ (2,5 МВ), $I_e = 30$ кА, $\tau_u = 30$ нс, $v/\gamma = 0,3$, сохранив конструкцию диода. Возросшая энергетика системы позволила дополнительно провести ряд ядерных реакций вплоть до реакций на естественном уране, который бомбардировался протонами и ионами углерода. Энергия ускоренных протонов превышала 15 МэВ. После отправки статьи [10] в печать были получены протоны с энергией 180 МэВ с выходом на калифорний (частное сообщение Сахлина). Открывшиеся энергетические возможности позволили провести ядерные реакции на углероде, фторе, кремнии, хлоре и других ионах, содержащихся в материале диэлектрической анодной вставки (частное сообщение Сахлина). Для сравнения в таблице приведены параметры установок и результаты, полученные в СФТИ и лаборатории Ливермора. Видно, что, несмотря на простую конструкцию и примитивность использованного оборудования в установках СФТИ (в начале 60-х годов еще не была развита мощная импульсная техника на формирующих линиях с распределенными параметрами), пионерские результаты ускорения ионов в электронных пучках достаточно высоки и соответствуют энергетике питания диода.

Наряду с отмеченными неточностями обратим внимание на неточность другого характера. На с. 1239 статьи

(правая колонка, 26-я строка снизу) утверждается, что "ускорение в А–К-промежутке было обнаружено сначала в [12]", т.е. в 1974 г. зарубежными учеными. Это утверждение ошибочно, поскольку в работе [1], опубликованной в 1967 г., на семь лет раньше, подчеркивается (с. 540, 17-я строка снизу), что "ускорение осуществляется в промежутке 1 и ...", т.е. в промежутке анод–катод (А–К).

Считаю, что представленная критика будет полезна для современного понимания проблемы ускорения ионов в мощных электронных пучках, а также для последующего развития этой проблемы.

Список литературы¹

1. Плютто А А и др. *Письма в ЖЭТФ* **6** 540 (1967) [99]
2. Короп Е Д, Плютто А А *ЖТФ* **40** 2534 (1970) [97]
3. Плютто А А и др. *Атомная энергия* **27** 418 (1969) [125]
4. Плютто А А и др. *ЖТФ* **43** 1627 (1973) [126]
5. Rhee M *J. Rev. Sci. Instrum.* **55** 1229 (1984) [*Приборы для научных исследований* **55** (8) 40 (1984)]
6. Рыжков В Н и др. *ЖТФ* **42** 2074 (1972)
7. Беленсов П Е и др. *ЖТФ* **34** 2120 (1964); Беленсов П Е *Физика плазмы* **12** 426 (1986)
8. Богданкевич Л С, Рухадзе А А *УФН* **103** 609 (1971) [69]
9. Luce J S, Sahlin H L, Crites T R *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-20** 336 (1973) [96]
10. Luce J S, Sahlin H L, Crites T R *Proc. IEEE* **10** 336 (1973)
11. Миллер Р *Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц* (М.: Мир, 1984)
12. Johnson D J, Kerns J R *Appl. Phys. Lett.* **25** 191 (1974) [117]

¹ Цифры в квадратных скобках в конце литературной ссылки соответствуют номеру ссылки на эту работу в обзоре А.Е. Дубинова, И.Ю. Корниловой, В.Д. Селемира *УФН* **172** 1225 (2002).