

# Краткие сообщения

04;10

## Коллективное ускорение ионов ксенона в виркаторе с плазменным анодом

© В.И. Челпанов, П.И. Голяков, В.Г. Корнилов, А.А. Волков,  
А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир, В.С. Жданов

Российский федеральный ядерный центр —  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: dubinov-ae@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 3 октября 2007 г.)

Изложены результаты исследования коллективного ускорения ионов ксенона в виркаторе с плазменным анодом. Показано, что энергия ускоренных ионов может достигать 900 MeV. Изображение источника тормозного излучения на мишени указывает на эффективную транспортировку релятивистских электронов в трубе дрейфа.

PACS: 29.17+w

### Введение

Коллективные методы ускорения ионов появились более 40 лет назад. Один из них основан на использовании явления образования виртуального катода (ВК). Существуют три основные схемы коллективного ускорения ионов в системах с ВК, получившие наибольшее теоретическое и экспериментальное развитие [1]: диодные отражательные системы, газонаполненные виркаторы и вакуумные виркаторы с генерацией ионов на аноде (диоды Люса, или виркаторы с плазменным анодом). В РФЯЦ-ВНИИЭФ с середины 1990-х гг. ведутся исследования коллективного ускорения ионов при использовании виркатора с плазменным анодом. Предыдущие результаты кратко изложены в [2].

Основная цель этих работ заключается в следующем:

- измерение энергии ускоренных ионов и их тока;
- нахождение таких режимов работы виркатора, при которых энергия и/или ток ионов максимальны.

Основными трудностями, встречающимися при измерении параметров мощных ионных пучков (МИП), являются:

- плазмообразование, возникающее под действием большого количества высокоэнергетических частиц на поверхности измерительных датчиков;
- разделение зарядов в плотных пучках;
- вторичная электронная эмиссия с поверхностей датчиков под действием МИП, которая может даже превышать ток ионов;
- сильный разогрев материала датчика из-за пикового характера процессов.

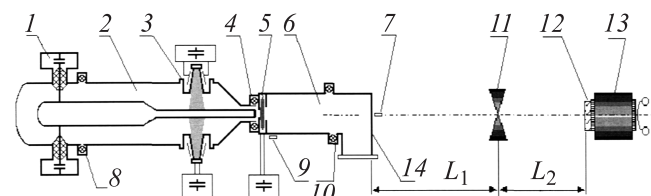
В настоящей работе исследуется коллективное ускорение ионов ксенона и демонстрируется эффективность модифицированного времяпролетного метода измерения

энергии ускоренных ионов. Этот метод основан на регистрации сигналов пролетного тока (тока в конце трубы дрейфа) и сигналов тормозного излучения на мишени в конце трубы дрейфа, а также на сопоставлении их с сигналами в начале трубы дрейфа.

### Экспериментальная установка.

Ускоритель, на котором проводились эксперименты, создан на основе двух изобретений [3,4], описывающих два его основных узла — плазменный прерыватель тока (ППТ) и виркатор с плазменным анодом. Схема ускорителя изображена на рис. 1.

ППТ содержит емкостный и индуктивный накопители энергии. Емкостный накопитель составляют четыре генератора Маркса ( $1.28 \mu\text{F}$ , 300 kV, 58 kJ). Индуктивный накопитель представляет собой коаксиальную вакуумную линию, общая индуктивность которой включая ин-



**Рис. 1.** Конструкция ускорителя и схема расположения датчиков: 1 — генераторы Маркса; 2 — индуктивный накопитель; 3 — ППТ; 4, 8, 10 — пояса Роговского ( $I_d$ ,  $I_t$ ,  $I_{tr}$  соответственно); 5 — плазменный анод; 6 — труба дрейфа; 7, 9 — X-датчики  $X_{tr}$ ,  $X_d$  соответственно; 11 — камера-обскура с диаметром отверстия 1 mm; 12 — конвертор на основе CsI(Tl); 13 — электронно-оптический регистратор; 14 — стенка трубы (мишень).

дуктивности генератора и передающей линии —  $1.2 \mu\text{H}$ . Особенностью ППТ, в соответствии с [3], является особая конструкция инжекторов плазмы, работающих по принципу индуктивной ионизации импульсно напускаемого газа. Уровень критического тока срабатывания ППТ задается длительностью инжекции плазмы в межэлектродный зазор до момента включения генераторов Маркса и определяет параметры первой короткой стадии протекания тока в нагрузке — электронном диоде. На этой стадии ток индуктивного накопителя падает, а в диоде формируется поток ускоренных электронов. Величина тока диода зависит от его первеанса и напряжения, подаваемого от индуктивного генератора. Нагрузкой накопителем энергии является планарный диод, состоящий из катода (диск диаметром  $180 \text{ mm}$ ) и плазменного анода. Устройство плазменного анода описано ранее [1,5,6]. Начальный межэлектродный зазор может задаваться как изменением положения катода, так и эффективной толщиной плазменного слоя. В экспериментах, описанных в данной работе, эффективный диодный зазор не изменялся. Плазмообразующий газ инжекторов ППТ — азот, плазменного анода — ксенон.

В экспериментах регистрировались: ток в ППТ ( $I_t$ ), ток в диоде ( $I_d$ ), ток в конце трубы дрейфа ( $I_{tr}$ ), сигналы с датчиков тормозного излучения („X-датчиков“), установленных в диодной области ( $X_d$ ) и за трубой дрейфа ( $X_{tr}$ ). Расстояние X-датчика в положении 7 от плазменного анода составляло  $1.8 \text{ m}$ . Регистрировалось также изображение источника тормозного излучения на мишени, представляющей собой стенку стальной трубы диаметром  $355 \text{ mm}$ , толщиной  $5 \text{ mm}$ , ось трубы перпендикулярна оси ускорителя. Расстояния на рис. 1 следующие:  $L_1 \cong 2 \text{ m}$ ,  $L_2 = 6\text{--}8 \text{ m}$ .

## Экспериментальные результаты.

На рис. 2 приведены осциллограммы, полученные в двух импульсах в одинаковых условиях. Отличие состоит лишь в том, что в первом импульсе (рис. 2, *a*) X-датчик располагался в диодной области, во втором (рис. 2, *b*) — за трубой дрейфа.

Из осциллограмм видно, что на спаде тока индуктивного накопителя формируется ток диода  $I_d$ . Одновременно возникают сигналы тормозного излучения диодного —  $X_d$  и пролетного X-датчика —  $X_{tr}$ . В начальный момент диодный X-датчик регистрирует большой сигнал. Но спустя короткий промежуток времени сигнал диодного X-датчика спадает почти до нуля, в то время как сигнал X-датчика в конце трубы дрейфа нарастает, вначале медленно, но в некоторый момент возникает серия „гигантских“ импульсов. Этому моменту соответствует резкое увеличение пролетного тока, такую динамику можно интерпретировать следующим образом. В начальной стадии формируется ВК в дрейфовой области, прилегающей к диоду. Электронный поток частично отражается назад в диод, частично (на уровне

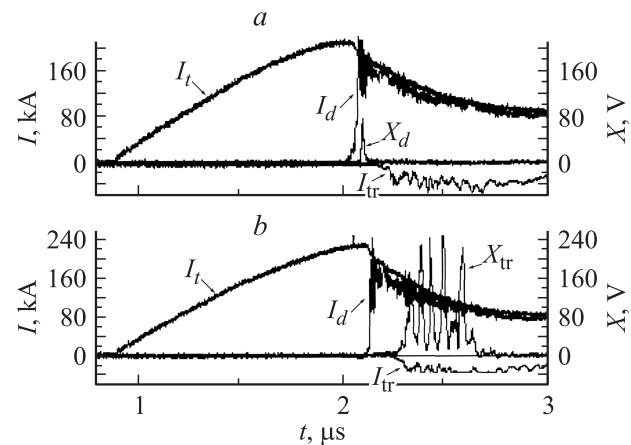


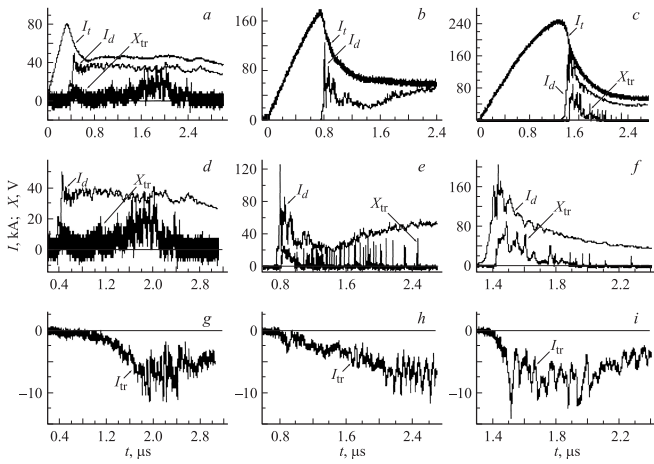
Рис. 2. Осциллограммы токов  $I_t$ ,  $I_d$ ,  $I_{tr}$  и сигналов с датчиков рентгеновского излучения  $X_d$ ,  $X_{tr}$  полученные в двух импульсах: *a* — X-датчик находился вблизи диода; *b* — X-датчик находился в конце трубы дрейфа.

$1 \text{ kA}$ ) пролетает до конца трубы дрейфа. Большая часть электронного потока выпадает на стенку трубы дрейфа вблизи ВК, генерируя тормозное излучение. Это проявляется в большем сигнале  $X_d$  и меньшем  $X_{tr}$ . Далее ионы ускоряются в диоде „плазменный анод–ВК“, ВК свою очередь отодвигается в направлении движения ионов и пролетных электронов, вместе с ним сдвигается область генерации тормозного излучения, излучение уходит из поля обзора датчика  $X_d$ .

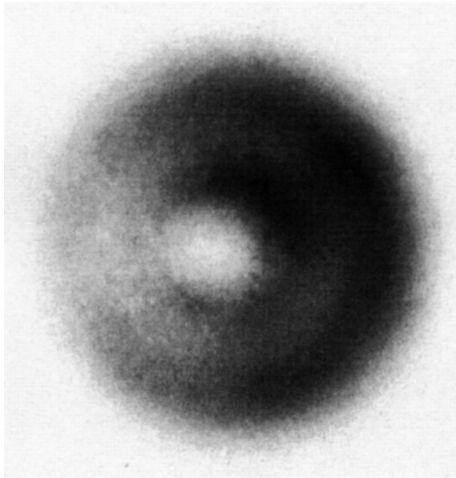
В процессе движения ВК, существование которого поддерживается электронами диода, включается механизм коллективного ускорения ионов, тем самым создается плазменный канал, вырастающий от диода к концу трубы дрейфа. В этот канал непрерывно поступают электроны диода, поддерживая существование ВК и ускоряя поток ионов. Резкий рост и формирование „гигантского“ импульса  $X_{tr}$  естественно интерпретировать как достижение ВК, нагруженного ионами, конца трубы дрейфа. Такой сценарий развития процесса наблюдался в [7] при численном моделировании. Пролетный ток в этой стадии превышает  $30 \text{ kA}$ . При этом источник тормозного излучения релятивистских электронов, прошедших по плазменному каналу, максимально приближен к датчику, что и обуславливает „гигантское“ значение сигнала.

Промежуток времени между моментами появления  $X_d$  и  $X_{tr}$  — длительность процесса ускорения ионов и одновременно время пролета ионами трубы дрейфа. Отсюда можно получить (среднюю) скорость ускоренных ионов. Пульсирующий характер осциллограмм отражает пульсации процесса ускорения. Некоторое рассогласование сигналов  $I_{tr}$  и  $X_{tr}$  может быть связано с интегральным характером тока и локальностью датчика  $X_{tr}$ . Причина пульсаций в настоящее время не ясна.

На рис. 3 проиллюстрирована возможность варьирования условий коллективного ускорения ионов. На этом рисунке представлены результаты трех импуль-



**Рис. 3.** Осциллограммы токов,  $I$ , и сигналов с датчиков рентгеновского излучения,  $(X)$ :  $a, c$  —  $I_{tr}$ ,  $I_d$ ,  $X_{tr}$ ;  $b$  —  $I_t$ ,  $I_d$ ;  $d, e, f$  —  $I_d$ ,  $X_{tr}$ ;  $g, h, i$  —  $I_{tr}$ .



**Рис. 4.** Изображение источника тормозного рентгеновского излучения.

сов, в которых начальное состояние плазменного анода было одинаковым, но изменялся режим работы ускорителя. Каждый столбец осциллограмм соответствует одному импульсу. Изменение длительности инжекции плазмы ППТ приводило к изменению критического тока, протекающего через плазму, переключения тока в диод и пикового диодного напряжения. Как видно из рис. 3, критический ток ППТ составлял 80 кА в первом, 170 кА — во втором и 240 кА — в третьем импульсах. Величина диодного тока составляла соответственно 40, 70 и 150 кА. Эти изменения привели к изменению длительности ускорения ионов, амплитудных значений  $I_{tr}$ ,  $X_{tr}$  и формы этих сигналов. Кроме того, из первого столбца рис. 3 видно, что длительность пролета электрон-ионного пучка превышала  $1 \mu s$ , в то время как в варианте третьего столбца это время уменьшилось до 130 ns. Во втором импульсе, как видно из рис. 3,  $e$  и

3,  $h$ , помимо очень быстрого сгустка электронов и ионов появилась серия коротких пичков.

На рис. 4 приведено интегральное по времени изображение источника рентгеновского излучения. На изображении помимо почти изотропного поля отчетливо просматривается кольцевая структура. Максимальный размер кольца приблизительно соответствует диаметру взрывоэмиссионного катода. Это соответствие указывает на возможность эффективной транспортировки релятивистских электронов в трубе дрейфа с плазменным каналом, содержащим коллективно ускоренные ионы.

## Заключение

Продемонстрирована возможность коллективного ускорения ионов в широком диапазоне энергий. Время пролета первого сгустка ионов при различных начальных условиях составляет от 50 ns до более  $1 \mu s$ . Для ионов ксенона минимальная длительность пролета соответствует 900 MeV. Необходимо, однако, подтверждение того, что эти значения не обусловлены более легкими примесными ионами.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ, проект № 1629. Работа одного из авторов (А.Е.Д.) поддерживалась грантом правительства Нижегородской области.

## Список литературы

- [1] Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225.
- [2] Chelpanov M.II., Demidov V.A., Khizhnyakov A.A. et al. // Proc. 12<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conf. Monterey, California, 1999. Vol. II. P. 1025.
- [3] Бабкин А.Л., Дубинов А.Е., Дубинов Е.Е. и др. Плазменный прерыватель тока. Патент РФ № 1811763. 22.04.1991.
- [4] Бабкин А.Л., Дубинов А.Е., Корнилов В.Г. и др. Виркатор. Патент РФ № 2046440. 08.06.1993.
- [5] Babkin A.L., Chelpanov V.I., Kornilov V.G. et al. // Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, New Mexico, 1993. Vol. II. P. 908.
- [6] Бабкин А.Л., Дубинов А.Е., Жданов В.С. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 4. С. 343.
- [7] Дубинов А.Е. // ТВТ. 2004. Т. 42. № 5. С. 676.