

04

## **Ускорение ионов плазмы, инжектированной в закритический релятивистский электронный пучок при его пространственно-временной модуляции**

© Д.В. Медведев, Н.И. Онищенко, Б.Д. Панасенко,  
Ю.В. Прокопенко, С.С. Пушкарев, П.Т. Чупиков

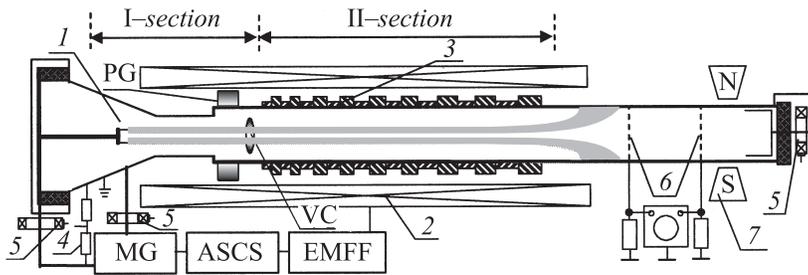
Национальный научный центр „Физико-технический институт“,  
Харьков, Украина  
E-mail: onish@kipt.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 29 января 2008 г.

Экспериментально исследуется ускорение ионов инжектированной извне плазмы коллективными полями виртуального катода и волны пространственного заряда сильнооточного релятивистского электронного пучка, промодулированного во времени и в пространстве. Модуляция во времени реализована полем виртуального катода, релаксирующего с низкой частотой в присутствии плазмы, а модуляция в пространстве — пространственно-периодическим магнитным полем.

PACS: 41.75.-i

Предложенная в [1] идея использования интенсивных коллективных полей пространственного заряда, возбуждаемых в плазме или сильнооточных релятивистских электронных пучках (РЭП), для высокоградиентного ускорения заряженных частиц была, в частности, реализована в экспериментах [2,3] с электронным пучком, модулированным во времени и пространстве. В настоящем сообщении экспериментально исследуется этот метод ускорения с использованием мощного РЭП, когда в отличие от [2], из-за большого объемного заряда пучка требуются нетрадиционные схемы модуляции тока РЭП. По сравнению с [3] для образования плазменного анода [4] в так называемом модифицированном диоде Льюиса [5] вместо неконтролируемого возникновения плазмы при попадании электронов РЭП на стенки камеры дрейфа использована



**Рис. 1.** Схема установки. MG — генератор Маркса; ASCS — запуск ускорителя и система контроля; EMFF — формирователь внешнего магнитного поля; VC — виртуальный катод; PG — плазменные пушки; 1 — магнитоизолированный диод; 2 — соленоид; 3 — чередующиеся железные и алюминиевые кольца; 4 — высоковольтный делитель на резисторах; 5 — пояс Роговского; 6 — времяпролетная диагностика; 7 — магнитный анализатор.

внешняя инжекция плазмы. Кроме того, реализована необходимая в эксперименте локализация места формирования виртуального катода. Для доказательства резонансного характера процесса ускорения проведена вариация длины ускорителя. В данной работе изложены результаты экспериментального исследования коллективного метода ускорения ионов, во-первых, в поле виртуального катода при внешней инжекции плазмы и, во-вторых, в поле волны плотности зарядов сильноточного РЭП, подвергнутого низкочастотной временной модуляции полем осциллирующего виртуального катода (ВК) и пространственной модуляции при распространении РЭП во внешнем пространственно-периодическом магнитном поле.

Схема установки, на которой выполнялись эксперименты по коллективному ускорению ионов, приведена на рис. 1.

Сильноточный трубчатый (диаметр 32 mm, толщина 1.5 mm) РЭП с энергией до 30 keV, током до 4 kA и длительностью 0.8  $\mu$ s генерируется импульсным электронным ускорителем „Агат“, базирующимся на магнитоизолированном диоде, запитываемом от генератора импульсного напряжения с энергией 0.9 kJ и помещенном в магнитном поле с индукцией 1.33 T. Коллективный ускоритель ионов состоит из двух секций: в первой — ионы инжектированной извне плазмы ускоряются полем виртуального катода, образуемого на электродинамическом

скачке камеры дрейфа, а во второй — полем волны пространственного заряда, возникающей в РЭП при его временной и пространственной модуляции. Модуляция тока сильноточного РЭП во времени проводится при периодической компенсации ионами поля пространственного заряда ВК и последующем восстановлении ВК, динамика которого в таком процессе теоретически исследована в [6]. Пространственная модуляция возникает при движении РЭП в пространственно-периодическом магнитном поле второй секции. Плазма инжектировалась в область ВК из четырех плазменных пушек бостиковского типа. Инжектируемая плазма, во-первых, была поставщиком ионов требуемого сорта и, во-вторых, приводила к релаксационным колебаниям ВК и модуляции тока РЭП во времени. Параметры потока ускоренных ионов измерялись цилиндром Фарадея, времяпролетным анализатором, магнитным анализатором и ядерно-физическими методами.

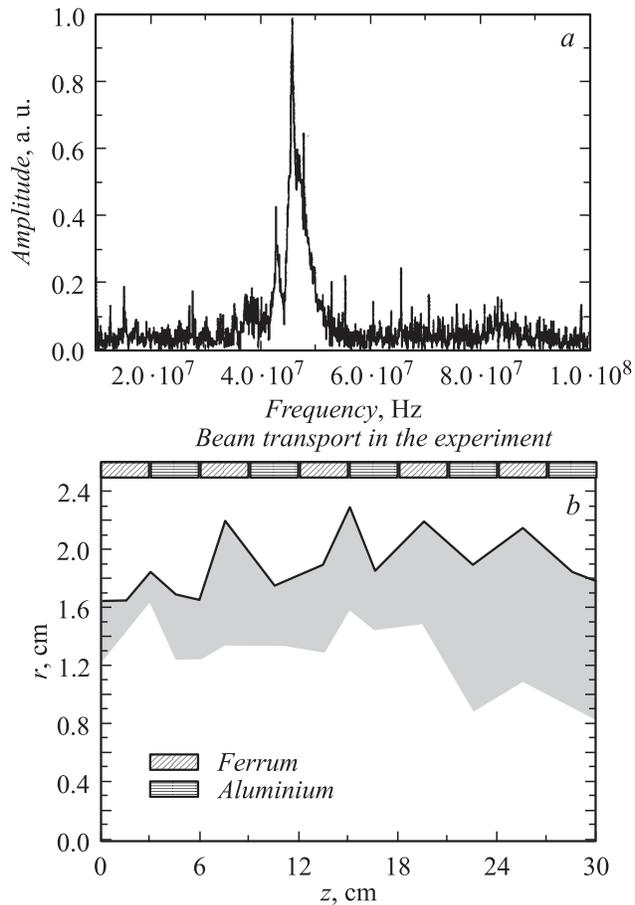
Сильноточный РЭП инжектировался в камеру дрейфа с коническим профилем на входе, который соответствовал градиенту магнитного поля на входе в соленоид (магнитное поле на катоде составляло 70% его величины в однородной части). В камере дрейфа для локализации места образования ВК в области инжекции плазмы был сделан скачок диаметра камеры дрейфа с 41 до 50 мм, для которого ток транспортируемого РЭП превышал предельный вакуумный ток.

Из осциллограмм тока РЭП, входящего с катода в камеру дрейфа и токов РЭП, транспортируемого в камере с диаметром 41 мм и расширяющегося в камере дрейфа после скачкообразного увеличения диаметра камеры до 50 мм, следует, что:

в первом случае ток РЭП, инжектированный с катода, практически без потерь фиксируется коллектором, установленным в конце камеры дрейфа в однородном магнитном поле;

во втором случае с электродинамическим скачком ток РЭП на цилиндр Фарадея значительно меньше и соответствует предельному вакуумному току для диаметра камеры дрейфа 50 мм [7], что свидетельствует о возникновении виртуального катода в этом месте.

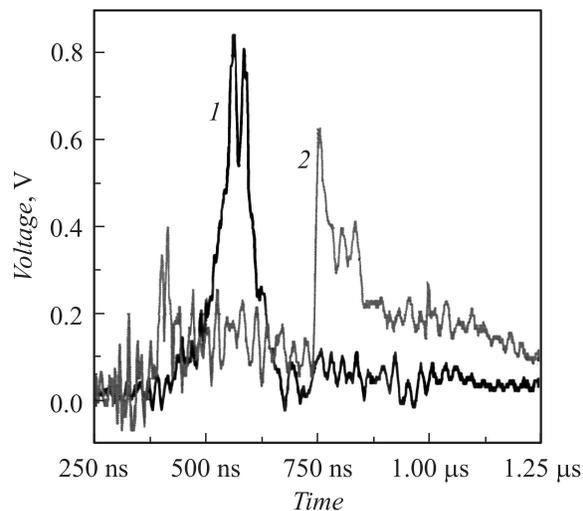
При внешней инжекции плазмы в область виртуального катода, осуществляемой при соответствующей синхронизации срабатывания плазменных пушек и инжекцией РЭП из ускорителя „Агат“, возникает низкочастотная модуляция тока РЭП. Ее регистрация производилась по измерению частотного спектра тормозного рентгеновского излучения РЭП на мишени из нержавеющей стали. На рис. 2,а представлен



**Рис. 2.** *a* — частотный спектр низкочастотной модуляции тока РЭП при инжекции внешней плазмы; *b* — пространственная модуляция РЭП при его движении в пространственно-периодическом магнитном поле.

такой спектр, показывающий, что спектральная функция рентгеновского излучения имеет максимум вблизи 46 МГц.

Пространственно-периодическая модуляция РЭП осуществлялась при транспортировке РЭП в пространственно-периодическом магнит-



**Рис. 3.** Сигналы с первого (1) и второго (2) сеточного зонда времяпролетных измерений.

ном поле, создаваемом набором колец из железа и алюминия, которые помещались в однородное магнитное поле. На рис. 2, *b* изображена радиально-продольная конфигурация трубчатого РЭП, двигающегося в таком магнитном поле. Она получена по отпечаткам РЭП на металлических пластинах, помещаемых на различных расстояниях от места инжекции.

Модуляция РЭП во времени и в пространстве приводит к возникновению медленной волны пространственного заряда [2], фазовая скорость которой  $v_\phi = L/f$ , где  $L$  — период пространственной модуляции,  $f$  — период временной модуляции. Синхронные с этой волной ионы оказываются захваченными в процесс ускорения, аналогичный имеющемуся в линейных резонансных ускорителях. В процессе ускорения ионов синхронизм может поддерживаться как увеличением периода пространственной модуляции, так и уменьшением периода временной модуляции.

На рис. 3 приведены оциллограммы сигналов ионного тока с двух разнесенных в пространстве сеток времяпролетного анализатора.

Тяжелые ионы регистрировались трековым детектором из нитрата целлюлозы, а ускоренные протоны — по трекам  $\alpha$ -частиц, полученных в ядерной реакции  $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ . Ток ускоренных ионов измерялся цилиндром Фарадея (при этом РЭП отклонялся поперечным магнитным полем), а их энергия — магнитным и времяпролетным анализаторами. Параметры ионного пучка, ускоренного полем ВК (I секция), следующие: энергия 490 keV, ток 200 А, плотность ионов  $6.3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ , плотность потока ионов  $(5.1-7.2) \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ , длительность импульса 50 ns, ионы занимают всю область трубчатого РЭП. Параметры потока ионов, доускоренных во II секции полем волны пространственного заряда РЭП: энергия 1500 keV, ток 30 А, длительность импульса 40 ns. При этом увеличение числа периодов пространственной модуляции с 6 до 9, с соответствующим удлинением последующего периода, привело к росту энергии ионов с 680 до 1500 keV, т.е. набор энергии пропорционален длине ускорения.

Таким образом, экспериментально исследованы возникновение виртуального катода на электродинамическом скачке и его взаимодействие с инжектированной извне плазмой, осуществлена модуляция сильноточного РЭП во времени и в пространстве и показана возможность эффективного ускорения ионов коллективными полями виртуального катода и волны пространственного заряда сильноточного РЭП.

## Список литературы

- [1] *Fainberg Ya.B.* // Proc. Symp. CERN: Geneva, 1956. V. 1. P. 84.
- [2] *Беликов В.В., Лымарь А.Г., Хижняк Н.А.* // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. В. 13. С. 615–617.
- [3] *Балакирев В.А., Горбань А.М., Магда И.И.* и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. С. 350–354.
- [4] *Chelpanov V.I., Demidov V.A., Khizhnyakov A.A.* et al. // 12th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, CA, USA, June 27–30, 1999. V. 2. P. 1025–1028.
- [5] *Luce J.S., Sablin H.L., Crites T.R.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. V.NS-20, N 3. P. 336–341.
- [6] *Балакирев В.А., Онищенко Н.И., Онищенко И.Н.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 530–538.
- [7] *Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А.* // УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609–640.