

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

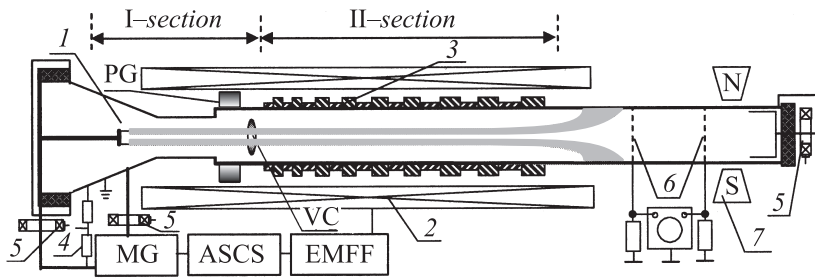


Рис. 1. Схема установки. MG — генератор Маркса; ASCS — запуск ускорителя и система контроля; EMFF — формирователь внешнего магнитного поля; VC — виртуальный катод; PG — плазменные пушки; 1 — магнитоизолированный диод; 2 — соленоид; 3 — чередующиеся железные и алюминиевые кольца; 4 — высоковольтный делитель 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 μ 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

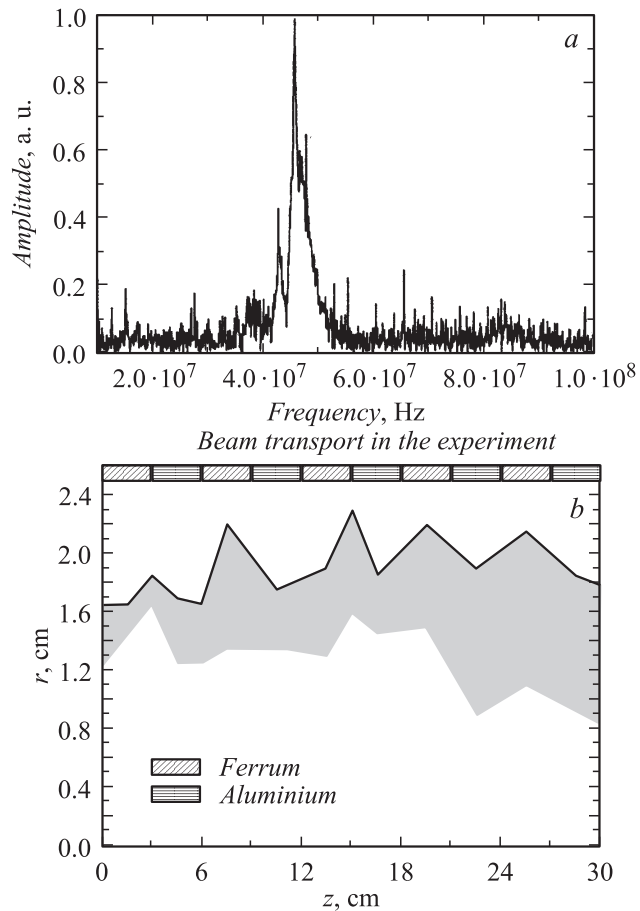


Рис. 2. *a* — частотный спектр низкочастотной модуляции тока РЭП при инжекции внешней плазмы; *b* — пространственная модуляция РЭП при его движении в пространственно-периодическом магнитном поле.

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-

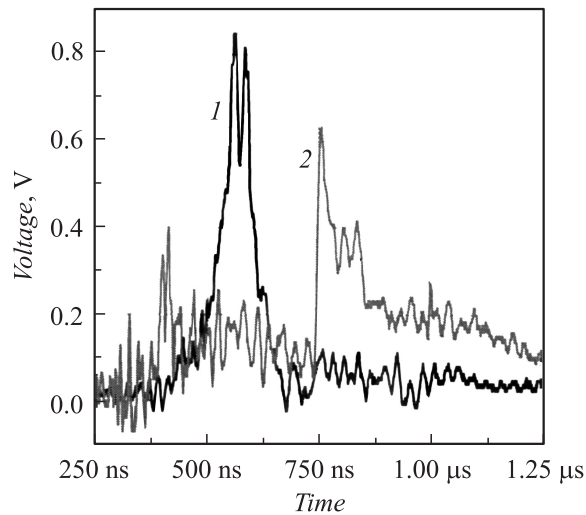


Рис. 3. Сигналы с первого (1) и второго (2) сеточного зонда времяпролетных измерений.

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 осциллограммы сигналов ионного тока с двух разнесенных в пространстве сеток времяпролетного анализатора.

Тяжелые ионы регистрировались трековым детектором из нитрата целлюлозы, а ускоренные протоны — по трекам α -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.