

10

## **Виртуальный анод как источник низкочастотных колебаний сильноточного электронного пучка**

© П.И. Марков, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников

Национальный научный центр  
„Харьковский физико-технический институт“  
E-mail: pmarkov@kipt.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 3 апреля 2003 г.

Приведены результаты исследований транспортировки релятивистского электронного пучка с током выше критического в цилиндрической камере дрейфа в присутствии ионного потока. Теоретический анализ динамики электрон-ионного образования базируется на методе крупных частиц (PIC). Показано, что при совместной инжекции сверхкритического электронного пучка и низкоэнергетического слаботочного ионного пучка в камере дрейфа наряду с электронным виртуальным катодом может образоваться виртуальный анод. Виртуальный анод периодически пульсирует. Численные результаты, полученные для ионов водорода и азота, показывают, что отношение частот пульсаций обратно пропорционально отношению масс ионов. Колебания виртуального анода приводят к модуляции во времени с той же частотой электронного и ионного токов на выходе дрейфовой камеры.

Для ускорения ионов в коллективном методе ускорения [1] необходима медленная волна пространственного заряда. Такая волна может быть получена путем пространственной и временной модуляции сильноточного электронного пучка. Необходимую для ускорения ионов низкочастотную модуляцию можно получить, пропуская сильноточный электронный пучок с током выше предельного вакуумного через

плазму. В работе [2] предложен один из возможных физических механизмов такой модуляции. Суть его состоит в следующем. Рассмотрим тонкий трубчатый электронный пучок, инжектируемый в вакуумную цилиндрическую камеру дрейфа. Предельный ток электронного пучка, который можно транспортировать через такую систему определяется выражением [3]:

$$I_{ce} = mc^3(\gamma_e^{2/3} - 1)^{3/2} / [2e \ln(R/r_e)], \quad (1)$$

где  $e$  — заряд,  $m$  — масса электрона,  $\gamma_e$  — релятивистский фактор электронов пучка,  $R$  — радиус камеры дрейфа,  $r_e$  — радиус электронного пучка.

Превышение тока по сравнению с предельным значением  $I_{ce}$  приводит к образованию виртуального катода (ВК). При наличии ионов в такой системе они будут ускоряться полем ВК и насыщаться в область минимума его потенциала. Ионы нейтрализуют объемный заряд сгустка электронов в области виртуального катода, что приводит к его рассасыванию. Разрушение виртуального катода останавливает поступление ионов в область виртуального катода. Таким образом, условия для образования виртуального катода возобновляются, и процесс повторяется.

Ниже мы рассмотрим другой механизм создания низкочастотной модуляции ионами, инжектируемыми в камеру дрейфа в том же направлении, что и электронный пучок. Ток инжектируемого ионного пучка, так же как и электронного, ограничивается своим предельным значением, величина которого определяется выражением [4], аналогичным (1)

$$I_{ci} = Mc^3(\gamma_i^{2/3} - 1)^{3/2} / [2e \ln(R/r_i)], \quad (2)$$

где  $M$  — масса,  $\gamma_i$  — релятивистский фактор,  $r_i$  — радиус пучка ионов.

Из сравнения выражений (1) и (2) следует, что даже при сравнимых энергиях нерелятивистских электронного и ионного пучков ионный предельный ток существенно меньше электронного,  $I_{ci}/I_{ce} \sim \sqrt{m/M}$ . При токах, больших  $I_{ci}$ , вблизи входа в камеру дрейфа образуется положительное облако зарядов (виртуальный анод (ВА)), отражающее ионы пучка. Частота колебаний ВА существенно ниже частоты колебаний ВК. При токах инжектируемых ионного и электронного пучков порядка соответствующих предельных значений  $\omega_i/\omega_e \sim \sqrt{m/M}$  ( $\omega_i$  — частота колебаний ВА,  $\omega_e$  — частота колебаний ВК). Осцилляции ВА

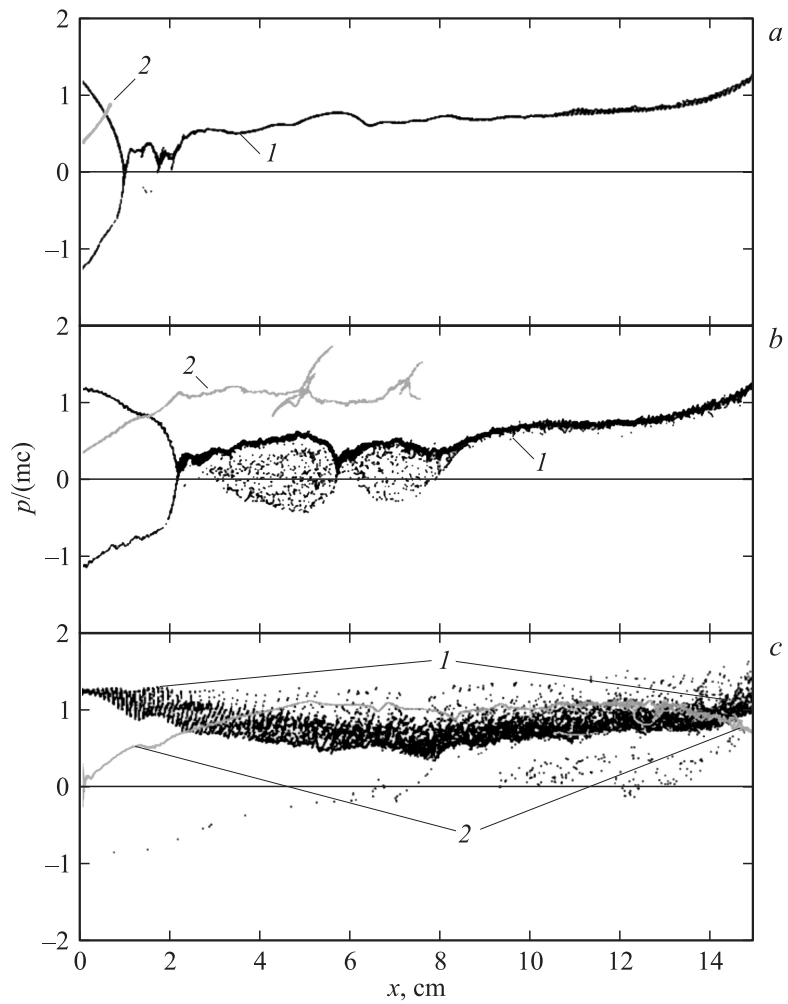
будут приводить к осцилляциям ионного тока на входе в камеру дрейфа. Изменяющаяся во времени зарядовая компенсация электронного пучка приведет к модуляции с низкой частотой электронного пучка. В настоящей работе приведены результаты полного численного моделирования динамики ВК в присутствии низкоэнергетических ионов в цилиндрическом резонаторе.

Для описания динамики электрон-ионного потока была выбрана следующая физическая модель. Тонкие кольцевые электронный и ионный пучки сквозь металлическую фольгу, прозрачную для частиц, попадают в цилиндрическую камеру дрейфа радиуса  $R$  и длиной  $L$ . В камере дрейфа имеется сильное магнитное поле, достаточное для того, чтобы движение частиц пучков считалось одномерным. Будем предполагать, что радиус электронного и ионного пучков совпадают  $r_e = r_i = r_b$ . Указанное предположение не является принципиальным для алгоритма численного моделирования. Обобщение на случай несовпадающих радиусов тонких пучков осуществляется введением дополнительного граничного условия.

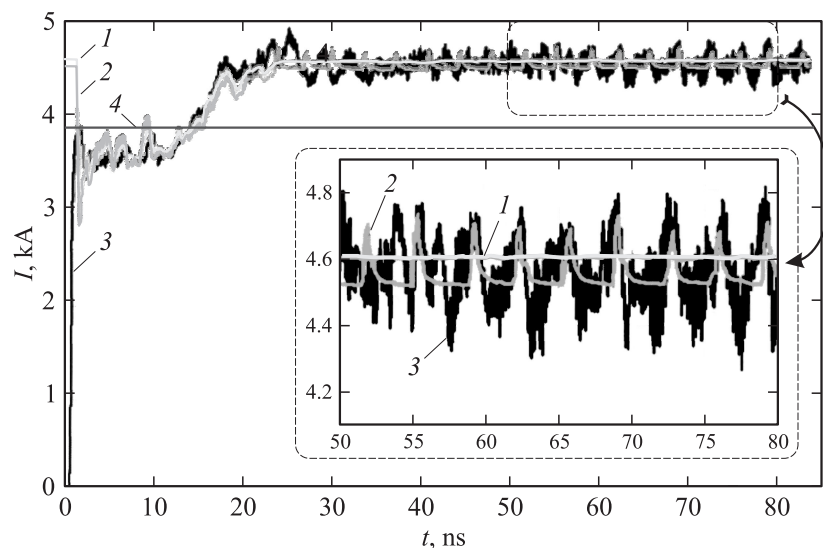
Алгоритм численного моделирования [5] базируется на методе крупных частиц [6]. В настоящее время он обобщен на случай инжекции частиц с произвольным знаком заряда. В обновленной версии численного кода „SOM“ для контроля точности численной модели использовался закон сохранения энергии. Для численного анализа были выбраны параметры экспериментальной установки „Агат“ [2]:  $R = 2.5$  см,  $r_b = 1.625$  см, входной ток электронного пучка  $I_b = 4.6$  кА, энергия электронов пучка  $eU_b = 280$  кэВ,  $L = 15$  см. Для таких размеров дрейфовой камеры и параметров электронного пучка предельный ток составляет  $I_{ce} = 3.8$  кА. Для моделирования плазмы в систему инжектировались низкоэнергетические ( $eU_i = 28$  кэВ) ионы водорода и азота. Ионный ток ( $I_i = 92$  А для водорода и  $I_i = 25$  А для азота) подбирался таким образом, чтобы невозмущенные плотности ионов и электронов были приближенно равными. Радиус ионного потока совпадал с радиусом электронного пучка. Предельный ток  $I_{ci}$  (2) для ионов водорода составлял  $\simeq 3.2$  А, а для ионов азота  $\simeq 0.87$  А.

Динамика процессов при совместной инжекции электронного пучка и потока ионов водорода происходила по следующей схеме. За времена порядка  $1$  нс на расстоянии  $1.0$  см от левого торца дрейфовой камеры образуется ВК (рис. 1, а). При этом количество ионов в системе мало и параметры виркатора практически полностью определяются

1\* Письма в ЖТФ, 2003, том 29, вып. 23



**Рис. 1.** Фазовые плоскости электронов (кривые 1) и ионов (кривые 2) для моментов времени: *a* —  $t = 1.54$  ns; *b* —  $t = 10.5$  ns; *c* —  $t = 23.97$  ns ( $p$  — импульс,  $x$  — продольная координата). Ординаты точек, соответствующих ионам, увеличены в  $\sqrt{M/m}$  раз.



**Рис. 2.** Временная динамика электронного (кривая 1) и полного тока (кривая 2) на входе и полного тока на выходе (кривая 3) резонатора; прямая линия (4) показывает предельный ток электронного пучка в вакуумной камере дрейфа.

электронами, положение ВК незначительно (на 0.2 см) сдвинуто вправо по сравнению со случаем, когда поток ионов в дрейфовую камеру отсутствует.

Ионы водорода в продольном электрическом поле ВК ускоряются до энергий, определяемых потенциалом ВК, т. е. до энергии, приблизительно равной начальной энергии электронов. Достигнув дна потенциальной ямы, созданной ВК, ионы движутся без ускорения с почти постоянной энергией.

В дальнейшем (рис. 1, *b*) накопление ионов в системе приводит к перемещению электронного ВК в глубь дрейфовой камеры. Величина напряженности электрического поля в области ВК падает, что сопровождается частичным его разрушением. Это приводит к росту выходного тока. Кроме того, в самом начале камеры дрейфа формируются условия для появления ионного ВА. Об этом свидетельствует появление

замедленных ионов в начале камеры дрейфа и положительная плотность поверхностного заряда.

Отмеченные факторы приводят к тому, что в момент времени  $t = 18 \text{ ns}$  в системе образуется ВА. Вместе с тем электронный ВК практически полностью разрушается.

Дальнейшее взаимодействие электронного и ионного потоков происходит без образования ВК. Сильно заторможенные электроны со временем уходят из резонатора, а вновь инжектированные тормозятся в значительно меньшей степени, но вместе с тем сильно термализуются. Типичную картину такого состояния иллюстрирует рис. 1, с.

ВА пульсирует во времени, периодически исчезая и появляясь, что приводит к появлению импульсов на кривой входного тока, а также к модуляции выходного электронного тока виркатора (рис. 2). Для ионов водорода частота пульсаций составляет 300 МГц.

Аналогично описанному выше было выполнено моделирование при инжекции в камеру дрейфа ионов азота. Качественно картина динамики процессов повторяется. Частота пульсаций токов на входе и выходе камеры дрейфа составляла 100 МГц, т.е. уменьшилась приблизительно в пропорции квадратного корня из отношения масс ионов азота и водорода. В отличие от водорода, при инжекции ионов азота на фоне пульсаций ВА возможен также режим периодического появления электронного ВК. Этот процесс существенно медленнее отмеченного выше, поскольку связан со временем пролета ионов через камеру дрейфа. Частота пульсаций электронного ВК примерно в 5 раз ниже частоты пульсаций ионного ВА.

Дальнейшая динамика системы определяется воздействием электронного и ионного потоков. Полный и электронный токи на выходе резонатора осциллируют вокруг равновесного значения, превосходящего предельный электронный ток. Частота этих осцилляций существенно ниже, а амплитуда существенно выше, чем в случае инжекции только электронного пучка.

Таким образом, исследованный механизм низкочастотной модуляции может быть использован для создания медленной волны в коллективном ускорителе ионов.

Приведенный анализ сделан в предположении одномерного движения электронов и ионов. Пренебрежение поперечным движением ионного пучка, распространяющегося в вакуумной камере дрейфа, справедливо при  $H^2 \gg (Mc^2/e)(E_r/R)$ , что для ионов водорода в

наших условиях потребовало бы наличия внешнего магнитного поля с напряженностью  $\sim 100$  кОе. Но это сильное требование существенно снижается, если учесть, что при совместной инжекции электронного и ионного пучков радиальные электрические поля значительно уменьшаются. В наших численных экспериментах мы выбирали ионный ток из условия зарядовой компенсации электронного пучка. Это необходимо для компенсации ВК, но одновременно такое условие значительно снижает требования к напряженности внешнего магнитного поля для поддержания равновесного ламинарного движения ионного пучка.

Работа выполнена при поддержке гранта УНТЦ № 1569.

## Список литературы

- [1] *Лымарь А.Г., Хижняк Н.А., Беликов В.В.* // ВАНТ. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра. 1973. В. 3 (5). С. 78–81.
- [2] *Балакирев В.А., Горбань А.М., Магда И.И.* и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 4. С. 350–354.
- [3] *Богданкевич А.С., Рухадзе А.А.* // УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609–640.
- [4] *Миллер Р.Б.* Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 432 с.
- [5] *Березин Ю.А., Вишивков В.А.* Метод частиц в динамике разреженной плазмы. Новосибирск: Наука, 1980. 98 с.
- [6] *Марков П.И., Онищенко И.Н., Сотников Г.В.* // 12-я Межд. конференция „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“ (КрыМиКо’2002). Севастополь, 9–13 сент. 2002 г. Материалы конференции. Севастополь: „Вебер“, 2002. ISBN: 966–7968–12–X. IEEE Catalog Number: 02EX570. С. 477–478.