

10

Особенности накопления электронов в сильноточной электронной ловушке

© А.Е. Дубинов, И.В. Макаров, С.А. Садовой,
С.К. Сайков, В.П. Тараканов

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной
физики, Саров, Нижегородская обл.
E-mail: dubinov-ae@yandex.ru
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступило в Редакцию 4 октября 2010 г.

Промоделированы симметричная динамика формирования виртуального катода (ВК) и сценарий установления сжатого состояния пучка, а также определены основные физические параметры этого процесса: момент времени рождения ВК и общее число накопленного заряда к этому моменту. Найденный симметричный сценарий качественно отличается от других сценариев, ранее описанных в литературе.

Сильноточные электронные ловушки, способные накапливать плотные электронные облака, находят широкое применение в различных областях техники современного физического эксперимента и, прежде всего, в источниках многозарядных ионов [1–3].

Коллективная динамика электронного пучка в ловушках, поперечная [4,5] и продольная [6,7], становится достаточно сложной по мере накопления электронов и приближения величины циркулирующего тока к пороговым значениям возбуждения многочисленных колебательных и апериодических неустойчивостей. В частности, в работе [7], в которой была смоделирована динамика электронов в длинной продольно-несимметричной ловушке с отношением ее длины к диаметру пучка $L/d = 600$ внутренней инжекции электронов, было показано, что, если циркулирующий ток достигнет половины предельного вакуумного тока, а затем начнет превосходить ее, в электронном пучке возникают два виртуальных катода (ВК). Эти два ВК несимметрично расширяются в продольном направлении, а затем сливаются и образуют своеобразный распределенный вдоль оси ловушки длинный ВК. Такой распределенный

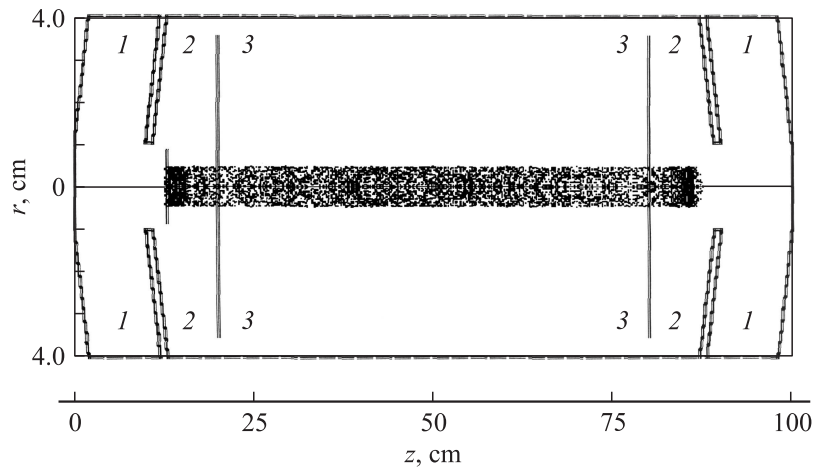


Рис. 1. Геометрия ловушки и электронного пучка: 1 — электростатические отражатели, 2 — симметрирующие электроды, 3 — аноды, 4 — термоэмиссионный катод.

ВК получил название сжатого состояния пучка [8,9]. В работе [6] была смоделирована симметричная ловушка с $L/d \approx 67$ с внешней инжекцией электронов, и там также было обнаружено установление сжатого состояния, но сценарий его установления был существенно другой — оно прорастало из точки отражения электронов в ловушке, расположенной на ее конце, противоположной точке инжекции электронов, а ВК в центре ловушки не возникали. Эти работы [6,7] вместе говорят о том, что сжатое состояние пучка может устанавливаться в ловушке по различным несимметричным сценариям, причем степень асимметрии сжатого состояния зависит как от симметрии ловушки, так и от ее длины.

В данной работе исследована динамика накопления электронов в симметричной ловушке с внутренней инжекцией электронов и с $L/d = 200$. Исследования проводились путем моделирования с помощью PIC-кода „Карат“ [10] (версия 90620). Геометрия ловушки с указанием необходимых размеров показана на рис. 1. Модель ловушки представляла собой вакуумированную цилиндрическую камеру, на обоих торцах которой находятся электростатические отражатели

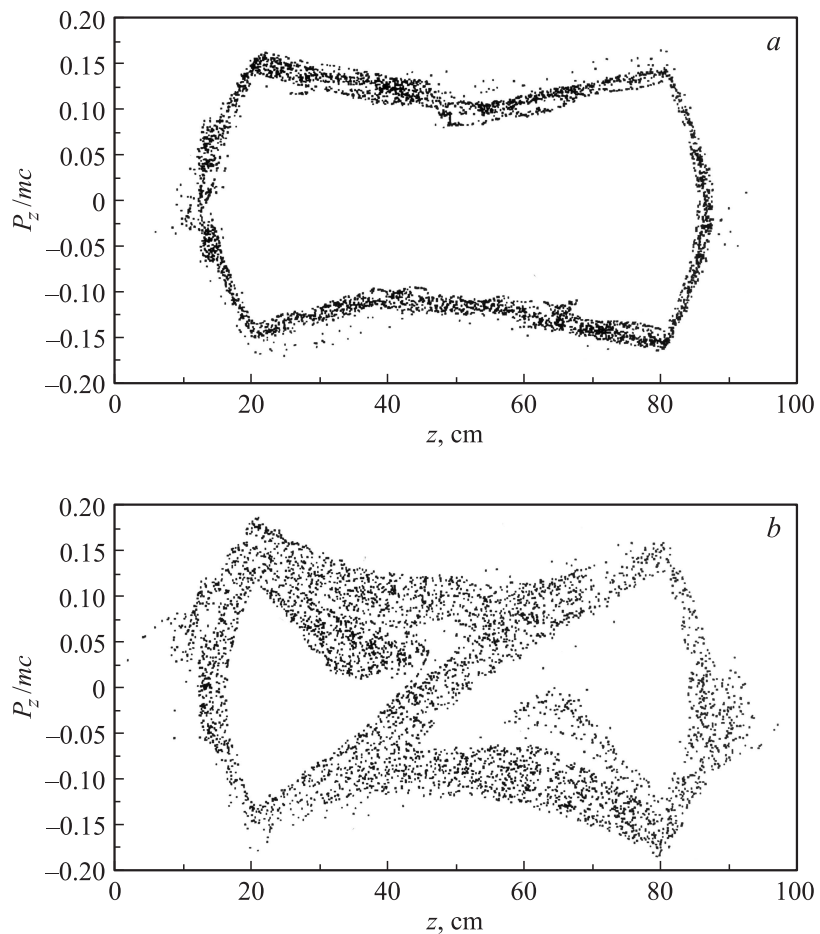


Рис. 2. Мгновенные фазовые портреты электронов в ловушке в различные моменты времени: $a - 1$; $b - 1.5$, $c - 2 \mu\text{s}$.

(-9 kV), симметризирующие электроды (-7 kV) и сетчатые (прозрачные для электронов) аноды (0 kV). С левой стороны между электродом и анодом находится сетчатый термоэмиссионный катод, положение и потенциал которого (-5 kV) не вносили существенных искажений в

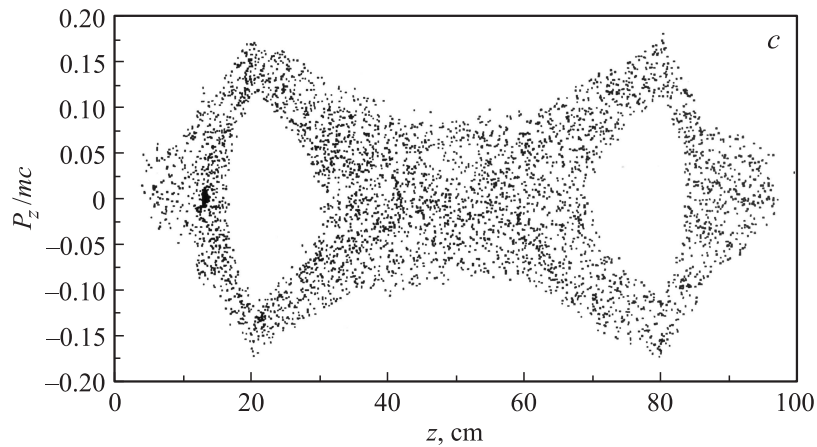


Рис. 2 (продолжение).

распределение поля между анодом и электродом. Считалось, что на систему наложено однородное магнитное поле величиной 5 kG.

Приведем в качестве примера результаты расчетов при токе термоэмиссии электронов 3 mA. На рис. 2 показана эволюция фазового портрета пучка электронов. К моменту времени $\approx 1.21 \mu\text{s}$ в центре ловушки в пучке возникает ВК, который симметричным образом начинает расширяться в обе стороны к концам ловушки, заполняя ее сжатым состоянием. Окончательная фазовая конфигурация показана на рис. 2, c, после установления которой эволюция электронного пучка прекращается. Отметим, что на всех этапах эволюции фазовый портрет симметричен относительно середины ловушки, в отличие от работ [6,7].

Показательна и динамика функции распределения электронов, (рис. 3): до момента формирования ВК она имеет пучковый вид, а после формирования ВК соответствует горячей электронной плазме. Такая своеобразная кинетика электронов, как и в [7], является следствием фазового перехода электронного ансамбля из состояния пучка в состояние электронной плазмы.

Процесс накопления электронов в ловушке развивается следующим образом. До момента образования ВК накопление числа электронов в ловушке происходит по линейному по времени закону. Далее в интервале 1.21–1.6 μs происходит несколько крупных выбросов элек-

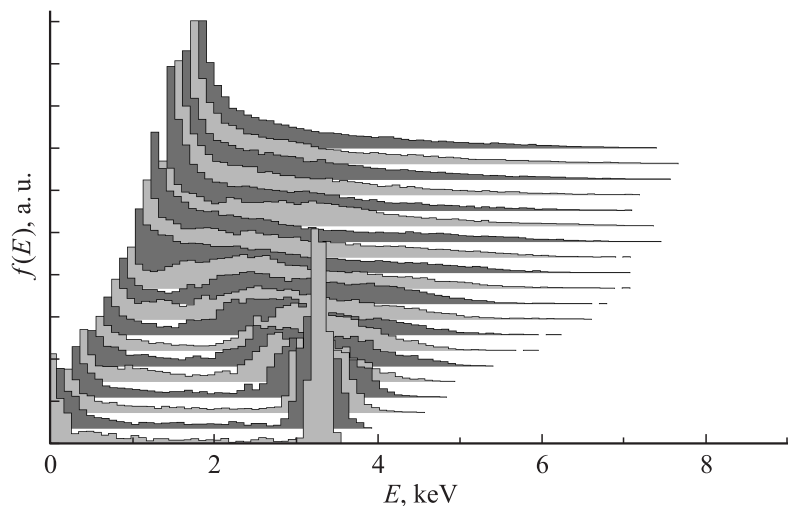


Рис. 3. Рассчитанная эволюция мгновенных функций распределения всех электронов в ловушке по энергии (с шагом по времени 100 ns).

тронов на торцы ловушки. Далее процесс накопления продолжается опять по линейному закону. Это свидетельствует о том, что импульс тока накопления может состоять из двух подимпульсов, которые и наблюдаются в экспериментах [11] и при моделировании [7].

Поясним также, что меняется при варьировании параметров задачи. Задание меньшего тока эмиссии или удлинение ловушки приводят к увеличению длительности развития всех фаз процесса. Изменение радиуса трубы дрейфа, поперечной геометрии пучка или величины катодного потенциала изменяет величину накопленного в ловушке заряда к моменту времени формирования ВК в соответствии с формулами для предельного тока в цилиндрической трубе дрейфа [12].

Таким образом, в работе численным методом продемонстрирована симметричная динамика формирования ВК и установления сжатого состояния пучка, а также определены основные физические параметры этого процесса: для приведенного примера (момент формирования ВК) $1.21 \mu\text{s}$, общее число накопленного заряда в ловушке (к моменту рождения ВК) 3.7 nC . Найденный симметричный сценарий качественно отличается от несимметричных сценариев работ [6,7].

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ (грант № 3454).

Список литературы

- [1] *Донец Е.Д.* // ФЭЧАЯ. 1982. Т. 13. № 5. С. 941.
- [2] *Donets E.D.* // The Physics and Technology of Ion Sources. N.Y.: Wiley, 1989. P. 245 (Пер.: *Донец Е.Д.* // Физика и технология источников ионов. М.: Мир, 1998. С. 267).
- [3] *Donets E.D.* // Rev. Sci. Instr. 1998. V. 69. N 2. P. 614.
- [4] *Fajans J., Backhaus E.Yu., McCarthy J.E.* // Phys. Plasmas. 1999. V. 6. N 1. P. 12.
- [5] *Yu J.H., Driscoll C.F., O'Neil T.M.* // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. N 5. P. 055702.
- [6] *Bettega G., Cavaliere F., Cavenago M.* et al. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. N 4. P. 042104.
- [7] *Донец Е.Д., Донец Е.Е., Сыресин Е.М.* и др. // Физ. плазмы. 2009. Т. 35. № 1. С. 61.
- [8] *Ignatov A.M., Tarakanov V.P.* // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. N 3. P. 741.
- [9] *Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю.* и др. // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
- [10] *Tarakanov V.P.* User's manual for code Karat. Berkley Research Associate Inc. Springfield. VA. 1992.
- [11] *Donets E.D., Donets D.E., Donets E.E.* et al. // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75. N 5. P. 1543.
- [12] *Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А.* // УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609.