

## О ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

А.Г. Лымарь

ННЦ “Харьковский физико-технический институт”  
61108, Харьков, ул. Академическая, 1, Украина

Предложен новый способ коллективного ускорения ионов в пространственно-периодическом виртуальном катоде, в котором синхронизм движения ускоряющей волны и ионного сгустка обеспечивается самим ионным сгустком. Проведено численное моделирование способа.

В [1] предложено использовать для ускорения ионов перепад потенциала, существующий на границе между состоянием электронного потока (ЭП) с виртуальным катодом (ВК) и состоянием ЭП без ВК. При реализации этого метода для обеспечения синхронизма движения ионного сгустка (ИС) и ускоряющей волны необходимо обеспечить плавное изменение параметров ЭП вдоль направления ускорения по некоторому закону.

В настоящей работе предлагается более простой в реализации способ ускорения ИС распределенным

ВК, параметры которого изменяются периодически вдоль направления ускорения, причем, синхронизм между ускоряющей волной и ИС обеспечивается самим ИС, который после входа в очередной ускоряющий период переводит ЭП в этом периоде из состояния с ВК в состояние без ВК, обеспечивая себе ускоряющее поле на выходе из периода.

Возможный вариант ускоряющего периода (УП) для реализации предлагаемого способа схематически изображен на рис.1. Он симметричен относительно осей  $x$  и  $y$  и содержит катоды 1, 1а и сетки 2.

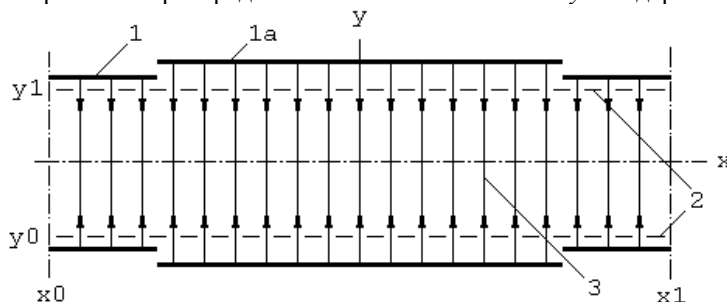


Рис.1. Схема ускоряющего периода: 1,1а – катоды; 2 – сетки; 3 – встречные электронные пучки

Верхняя и нижняя сетки имеют одинаковый потенциал. Потенциалы катодов 1 и 1а относительно сеток различны. Это позволяет при ограниченной эмиссионной способности катодов формировать во встречных ЭП состояния с ВК с периодически изменяющимися вдоль оси  $x$  параметрами. В частности, возможно в центральной части УП создать состояние с ВК, близкое к границе, при которой происходит переход ЭП в состояние без ВК. В этом случае возможно малым возмущением произвести существенную перестройку состояния потока и соответственно электрических полей в центральной части УП. Таким возмущением может быть заряд ИС, входящего в период вдоль оси  $x$ .

Процесс взаимодействия ИС с распределенным ВК в устройстве, изображенном на рис.1, исследовался численно методом крупных частиц. Пространство дрейфа электронов разбивалось на ячейки. Количество узлов вдоль осей координат некоторая степень двойки, типичные значения  $N_x=1024$  узла вдоль оси  $x$  и 128 узлов вдоль оси  $y$ . Расчет потенциала производился с помощью быстрого преобразования Фурье. Граничные условия в плоскостях  $x_0$  и  $x_1$  –  $x$ -компонента электрического поля равна нулю.

Электроны поступают в пространство дрейфа из каждого узла, расположенного на сетках через равные временные интервалы с начальной скоростью, направленной вдоль оси  $y$ . Электроны, пересекающие плоскости сеток в дальнейших вычислениях не учитываются. Для сокращения объема вычислений предполагается, что можно пренебречь  $x$ -компонентой скорости электронов (приложено достаточно сильное магнитное поле, направленное вдоль оси  $y$ ). Уравнения движения нерелятивистские.

ИС моделируется равномерно заряженным жестким стержнем, бесконечным вдоль оси  $z$ . Сечение стержня плоскостью  $xy$  – эллипс, с полуосями вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно 64 и 16 узлов. Плотность заряда ИС выбиралась такой, чтобы согласно грубым оценкам обеспечивалась продольная и поперечная устойчивость ИС в случае, когда ионам будет предоставлена свобода. Она составляла 85% от плотности ЭП при инжекции.

Исследования проводились с помощью ЭП, в котором распределенный ВК приготавливался следующим образом. Сначала некоторый промежуток времени производится инжекция ЭП с однородным по  $x$  первансом выше критического значения. После образования ВК начинается период, когда скорости инжектируемых электронов плавно увеличиваясь во

времени переходят к новым значениям (соответственно уменьшается первеанс потока), причем, на участке катода 1а увеличение скорости больше, чем на участках катодов 1. Конечной целью описанной выше процедуры является получение в центральной области периода ВК, близкого к границе срыва этого состояния, а в периферийных областях более устойчивого ВК, который не исчезает ни при исчезновении ВК в центральной области, ни при прохождении через эту область ИС. Полученное состояние ЭП в пространстве дрейфа запоминается и используется в качестве исходного в последующих вычислениях.

Ниже приведены результаты исследования взаимодействия упомянутого исходного состояния с ИС, который покоится или движется с постоянной скоростью.

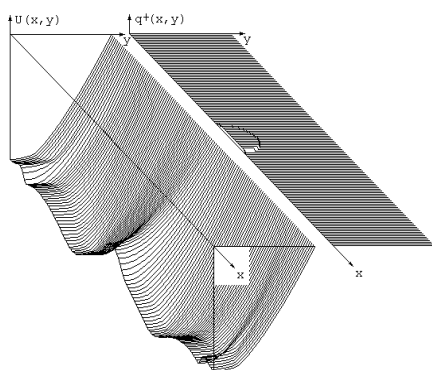


Рис.2. Конечное распределение потенциала (слева) и плотности заряда ИС (справа) в плоскости  $x, y$ .

$$U(x,y) = U(x,-y), q(x,e) = q(x,-y)$$

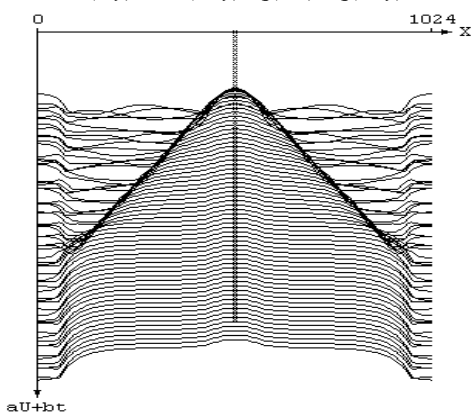


Рис.3. Зависимости от времени распределения потенциала в плоскости  $y=(y_0+y_1)/2$  и положения центра ИС (крестики)

На рис.2 приведено распределение потенциала в исходном состоянии ЭП для случая, когда в центре УС помещен неподвижный ИС. Эволюция такого начального состояния иллюстрируется рис.3, где приведены зависимости потенциала в плоскости  $y=(y_0+y_1)/2$  от координаты  $x$ , регистрируемые через равные интервалы времени ( $a$  и  $b$  – масштабные коэффициенты). На рис.3 виден инициированный ИС переход ЭП в состояние без ВК. Переход представляет собой волну смены состояний (ВСС), описанную в [2], которая распространяется с постоянной скоростью от центра к краям периода. На рис.3 вид-

ны также характерные для состояния с ВК осцилляции потенциала во времени.

На рис.4 приведено распределение потенциала, которое устанавливается после завершения перехода ЭП в центральной части периода в состояние без ВК.

На рис.5 показан случай, когда ВСС инициирована ИС, входящим в период со скоростью меньшей скорости ВСС. В этом случае к моменту прихода ИС к правой границе периода процесс смены состояний уже завершен.

Из рис.2-4 видно, что после прихода ВСС к правой границе периода, для запаздывающего ИС здесь образуется ускоряющий перепад потенциала. После ускорения на этом перепаде ИС попадает в очередной УП, и ситуация рис.5 повторяется, но уже при большей скорости ИС.

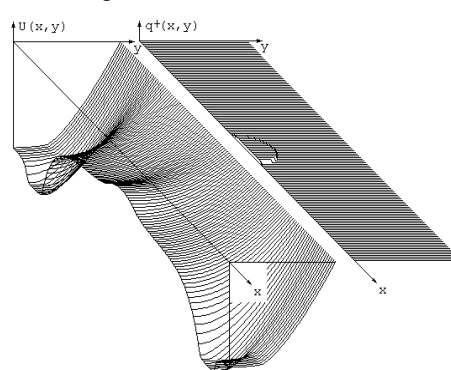


Рис.4. Конечное распределение потенциала (слева) и плотности заряда ИС (справа) в плоскости  $x, y$ .

$$U(x,y) = U(x,-y), q(x,e) = q(x,-y)$$

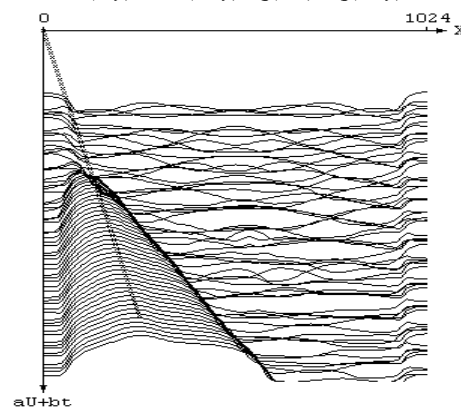


Рис.5. Зависимости от времени распределения потенциала в плоскости  $y=(y_0+y_1)/2$  и положения центра ИС (крестики)

В приведенных выше случаях роль ИС сводилась только к инициированию ВСС в ЭП, дальнейшее поведение ВСС мало зависит от ИС. Ситуация меняется, если скорость ИС сравнима или больше скорости ВСС.

Исследование процесса взаимодействия ИС и ВСС проводилось в УС вдвое большей протяженности вдоль оси  $x$ . Граничные условия в плоскостях  $x_0$  и  $x_1$  позволяют сделать это без увеличения времени счета. В качестве исходного было выбрано состояние ЭП, в котором в центре УП уже имеется состояние без ВК. Эволюция этого состояния при отсутствии ИС показана на рис.6. На рис.7 и 8 показано развитие процесса во времени, когда в начальный

момент времени в центре УП помещается движущийся ИС. Из этих рисунков видно, что движение ВСС синхронизовано с движением ИС. ИС управляет движением ВСС, “тянет” ее за собой.

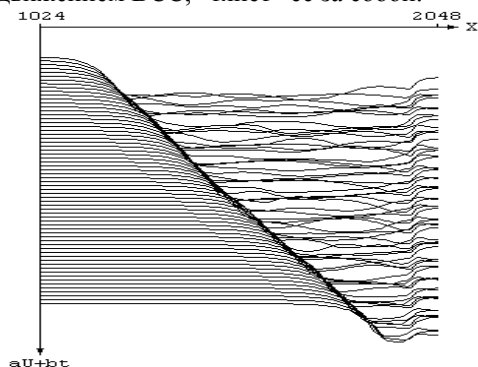


Рис.6. Зависимости от времени распределения потенциала в плоскости  $y=(y_0+y_1)/2$  и положения центра ИС (крестики)

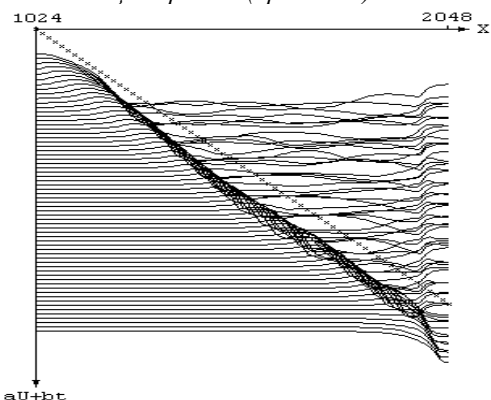


Рис.7. Зависимости от времени распределения потенциала в плоскости  $y=(y_0+y_1)/2$  и положения центра ИС (крестики)

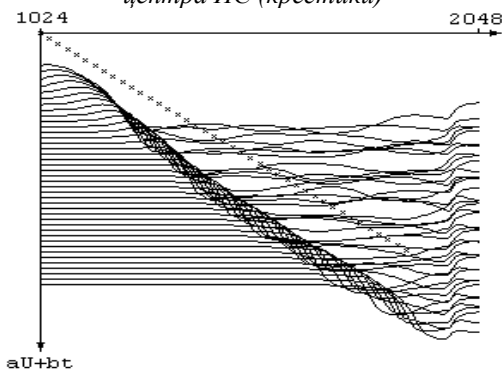


Рис.8. Зависимости от времени распределения потенциала в плоскости  $y=(y_0+y_1)/2$  и положения центра ИС (крестики)

#### ABOUT AN OPPORTUNITY OF IONS ACCELERATION BY A SPATIALLY PERIODIC VIRTUAL CATHODE

A.G. Lymar

The new method of collective ion acceleration in the spatial - periodic virtual cathode, in which synchronism of an accelerating wave and an ion bunch provided by an ion bunch itself, is offered. The numerical modeling of the method is carried out.

#### ПРО МОЖЛИВІСТЬ ПРИСКОРЕННЯ ІОНІВ ПРОСТОРОВО-ПЕРІОДИЧНИМ ВІРТУАЛЬНИМ КАТОДОМ

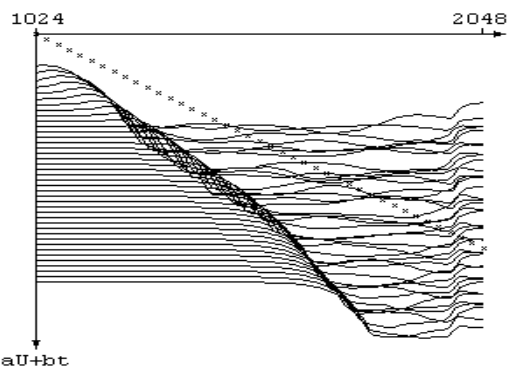


Рис.9. Зависимости от времени распределения потенциала в плоскости  $y=(y_0+y_1)/2$  и положения центра ИС (крестики)

На рис.8 скорость ИС близка к предельной, при которой еще имеет место контроль движения ВСС. Если еще немного добавить скорость, происходит потеря контроля. Этот случай показан на рис.9.

Приведенные результаты численного моделирования показывают следующее:

- Предлагаемый способ “самосинхронизуемого” ускорения ИС имеет место;
- Если скорость ИС в процессе ускорения сравнивается со скоростью ВСС, происходит смена механизма ускорения, “самосинхронизуемое” ускорение сменяется ускорением полем ВСС [1];
- Существует интервал различия скоростей ВСС и ИС, в котором имеет место предсказанный ранее [3] эффект управления скоростью движения ВСС полем ИС. Этот эффект позволяет ускорять ИС до скоростей, превышающих собственную скорость ВСС почти вдвое.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. №1263187 Способ ускорения ионов // А.Г. Лымарь, В.В. Беликов, А.В. Звягинцев, В.И. Приступа, Н.А. Хижняк // Открытия. Изобретения. 1990. №36. с.290.
2. А.Г. Лымарь. Волны смены состояний в электронном потоке с распределенным виртуальным катодом // Физика плазмы. 2003, т.29, № 1, с.85.
3. А.Г. Лымарь. Характерные особенности ускорения ионов волной смены состояний электронного потока // Тезисы докладов 16 Международного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. 1999, Алушта, 6-12 сентября / ННЦ ХФТИ, с.123.

*А.Г. Лимар*

Запропоновано новий спосіб колективного прискорення іонів у просторово-періодичному віртуальному катоді, у якому синхронізм руху хвилі, що прискорює, і іонного згустку забезпечується самим іонним згустком. Проведено чисельне моделювання способу.