

КОЛЛЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА

А.Г. Лымарь

ННЦ ХФТИ, г.Харьков, Академическая, 1, 61108, Украина
lymar@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты численного моделирования поведения границы распределенного виртуального катода плоской геометрии, описаны различные варианты ускоряющих систем, позволяющих использовать электрическое поле границы виртуального катода для коллективного ускорения ионов. Качественно обосновывается возможность продольной и поперечной устойчивости ускоряемого сгустка и устойчивости системы ионный сгусток – ускоряющая волна.

В [1] предложен способ коллективного ускорения ионов электрическим полем границы виртуального катода. Это предложение основывалось на предположении, что электронный поток в интервале гистерезиса состояний ведет себя аналогично тому, как ведут себя другие известные системы с гистерезисом состояний, например, простейшая активная линия, предложенная в качестве модели нервного волокна [2]. Качественное подтверждение того, что упомянутая аналогия имеет место, было получено в экспериментах с высокоэнергетическим потоком ионов [3].

Для получения более детальной информации о поведении границы распределенного виртуального катода было проведено его численное моделирование. Ниже приведены результаты такого моделирования.

Схема исследуемого устройства представлена на рис.1. Электроны ускоряются в зазоре катод 1 – сетка 2 и попадают в пространство дрейфа между сеткой и коллектором 3. Между катодом и сеткой приложена разность потенциалов U_k . Сетка и коллектор закорочены.

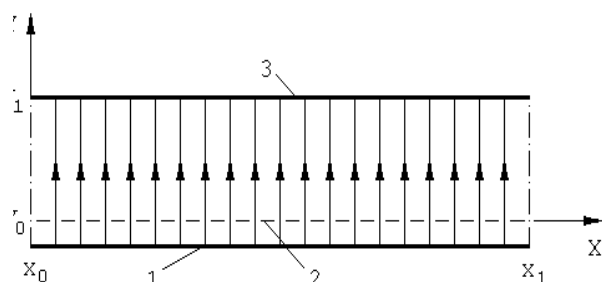


Рис.1. Схема исследуемого устройства:
1 – катод; 2 – сетка; 3 – коллектор

Согласно теории [4,5] состояние потока в пространстве дрейфа между сеткой и коллектором определяется безразмерной величиной $J=J_{inj}/J_d$, где J_{inj} – плотность инжектируемого тока, а

$$J_d = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U_k^{3/2}}{(y_1 - y_0)^2}.$$

При увеличении J от нуля до $J < 8$ все электроны, инжектируемые в пространство дрейфа, пересекают его и поглощаются коллектором. При $J=8$ происходит необратимый переход потока в состояние, когда часть из инжектированных электронов возвращается на сетку, как если бы она была эмиттирована катодом, расположенным в пространстве дрейфа. Такое состояние

называют состоянием с виртуальным катодом (ВК). После возникновения состояние с ВК существует при $J > 4$. При $J=4$ состояние с ВК необратимо переходит в состояние без ВК (при численном моделировании состояния с ВК [6] было обнаружено, что теоретические результаты, приведенные в [4,5], должны быть уточнены: в состоянии с ВК имеют место осцилляции, и из-за их наличия ВК исчезает при $4 < J_{min} \approx 5,8$).

Из изложенного выше следует наличие гистерезиса состояний. Для каждого значения J в интервале гистерезиса ($J_{min} < J < 8$) в зависимости от предыстории пучок может существовать либо в состоянии с ВК, либо в состоянии без ВК. Каждое из этих состояний устойчиво при малых возмущениях.

До сих пор рассматривалось поведение системы, однородной по координатам x и z . Пусть теперь в системе, находящейся в одном из возможных состояний при $J_{min} < J < 8$, на некотором интервале $x_0 < x < x_1$, величина J в некоторый момент времени изменена настолько, что поток на этом интервале переходит в другое возможное состояние, и после этого перехода величина J принимает прежнее значение. В результате получаем соседство двух различных состояний, которые могут существовать при данном значении J . Поскольку каждое из этих состояний в отдельности устойчиво, вдали от границы между состояниями все происходит так, как если бы границы не было вообще, поэтому все изменения могут происходить только на границе.

Целью численного моделирования является исследование процессов, происходящих на границе между состояниями в пространстве дрейфа устройства, изображенного на рис.1.

Расчет производился методом крупных частиц. Движение частиц происходит в прямоугольной области. Количество узлов вдоль осей координат некоторая степень двойки, типичные значения 1024 узла вдоль оси x и 128 узлов вдоль оси y . Расчет потенциала производится с помощью быстрого преобразования Фурье. Начальные условия задаются таким образом, что в плоскостях x_0 и x_1 x -компонента электрического поля равна нулю, т.е. имеет место четная периодичность вдоль оси x с периодом $2(x_1 - x_0)$. Частицы инжектируются с начальной скоростью, направленной вдоль оси y , в каждом узле оси x на каждом временном интервале интегрирования уравнений движения. Предполагается, что можно пренебречь x -компонентой

скорости частиц (приложено достаточно сильное магнитное поле, направленное вдоль оси y). Уравнения движения нерелятивистские. При моделировании предполагается также, что частицы из пространства дрейфа, пересекаящие плоскости сетки или коллектора, поглощаются этими электродами.

Ниже представлены результаты исследований эволюции во времени систем, которые составлены в начальный момент из двух различных состояний, соответствующих некоторому значению J из интервала гистерезиса.

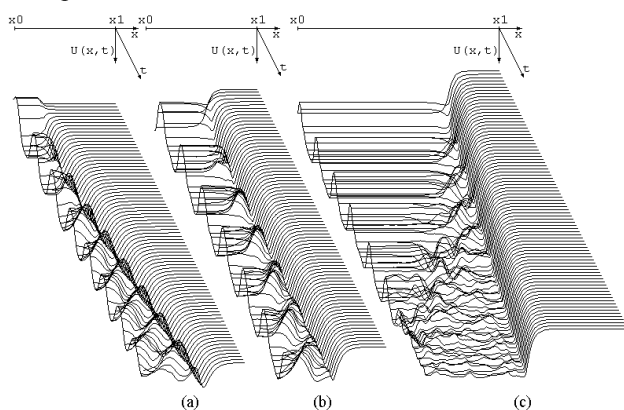


Рис.2. Зависимость потенциала в средней плоскости пространства дрейфа от x и t при различных значениях плотности тока инжекций: а) $J=7,88,4096$ инжекций; б) $J=7,4,4096$ инжекций; в) $J=5,85,8192$ инжекций

На рис.2 приведена эволюция во времени границы между состояниями с ВК и без ВК для различных значений плотности инжектируемого тока. Каждая кривая на рисунке – зависимость от координаты x потенциала в средней плоскости пространства дрейфа в некоторый момент времени.

Рис.2,а иллюстрирует процесс поглощения состояния без ВК состоянием с ВК, рис.2,б – случай практически неподвижной границы между состояниями, а рис.2,в – процесс поглощения состояния с ВК состоянием без ВК. Для случая (в) величина (x_1-x_0) была задана вдвое больше, чем для случаев (а) и (б).

Как видно из рис.2, в случае (в) с течением времени качественно меняются характер осцилляций в состоянии с ВК. Осцилляции с большим периодом и амплитудой сменяются осцилляциями меньшего периода и амплитуды. Можно предположить, что здесь проявляется еще одно состояние с ВК, описанное в [7,8]. Это состояние по терминологии [7] высокочастотная мода ВК (ВЧВК) имеет частоту примерно втрое большую, чем обычная низкочастотная мода ВК (НЧВК), и малую амплитуду. В работе [7] состояние ВЧВК возникает при сбросе объемного заряда в пространстве дрейфа путем резкого уменьшения тока инжекции. В нашем случае сброс заряда имеет место вблизи границы между НЧВК и состоянием без ВК, что может спровоцировать появление ВЧВК. Как видно из рис.2,в, после образования ВЧВК некоторое время сосуществуют три состояния: ВЧВК, поглощающее НЧВК, и состояние без ВК, поглощающее ВЧВК.

В связи с появлением состояния ВЧВК представляет интерес его взаимодействия с состоянием без ВК и НЧВК.

Прежде всего была выяснена область значений J , при которых может существовать состояние ВЧВК (состояние НЧВК, как известно, существует при $J > J_{min}$). Расчеты, проведенные для однородной по координате x системы показали, что состояние ВЧВК может существовать только внутри интервала гистерезиса (при $J_{min} < J < 8$).

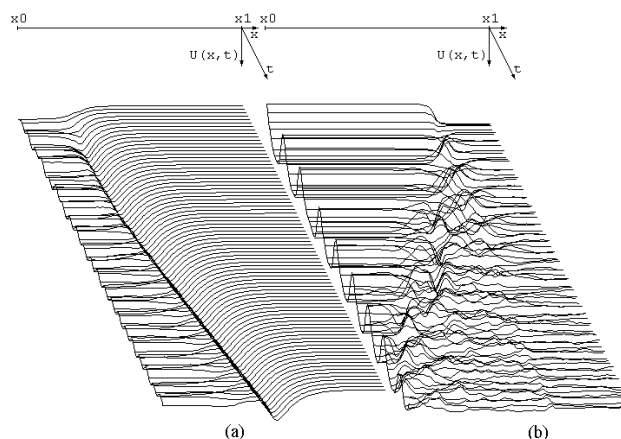


Рис.3. Зависимость потенциала в средней плоскости пространства дрейфа от x и t при различных значениях плотности тока инжекций: а) $J=7,85$. Взаимодействуют ВЧВК и состояние без ВК, 4096 инжекций; б) $J=6,0$. Взаимодействуют НЧВК и ВЧВК, 8192 инжекций

Эволюция состояний системы ВЧВК - состояние без ВК при $J=7.85$ приведена на рис.3,а.

При взаимодействии НЧВК и ВЧВК происходит поглощение НЧВК во всем интервале гистерезиса. Скорость поглощения тем выше, чем меньше J . Оценка величины скорости затруднительна, так как нет четкой границы между состояниями. Эволюция состояний системы НЧВК - ВЧВК при $J=6.0$ приведена на рис.3,б.

На рис.4 показана зависимость величины V/V_i , где V - скорость движения границы между состояниями а $V_i=1$ - скорость частиц в момент инжекции, от приведенной плотности инжектируемого тока J (скорость считается положительной, при движении волны слева направо). Из рис.4 видно, что зависимость скорости движения границы от J для системы НЧВК - состояние без ВК практически такая же как и для системы ВЧВК - состояние без ВК.

Если рассматривать приведенные выше результаты с точки зрения того, как их можно использовать для ускорения ионов, можно сделать следующие выводы:

- На границе между состояниями НЧВК (ВЧВК) - состояние без ВК, как это видно из рис.2, существует перепад потенциала такой, что ионы могут ускоряться, если состояние без ВК поглощает состояние НЧВК (ВЧВК);

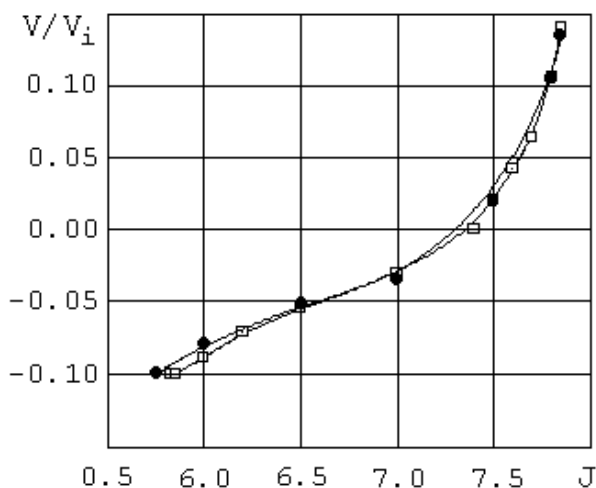


Рис.4. Зависимость скорости движения границы между состояниями от плотности инжектируемого тока. - HЧВК – состояние тока без ВК; ● - ВЧВК – состояние тока без ВК

- В случае, когда состояние ВЧВК поглощает состояние без ВК (рис.3,а), также возможно ускорение ионов, так как на границе между состояниями ВЧВК - состояние без ВК существует потенциальная яма;

- Если предположить, что протоны могут быть ускорены до максимальной скорости волны, полученной при данном расчете, то энергия протонов будет примерно в 20 раз превышать энергию инжектируемых электронов. Примерно такие же значения получены в лучших экспериментах по коллективному ускорению ионов в сильноточных электронных пучках [9,10].

Из рис.4 видно, что скорость перемещения границы определяется величиной приведенной плотности электронного потока J . Это позволяет подходящим подбором зависимости J от координаты x обеспечить

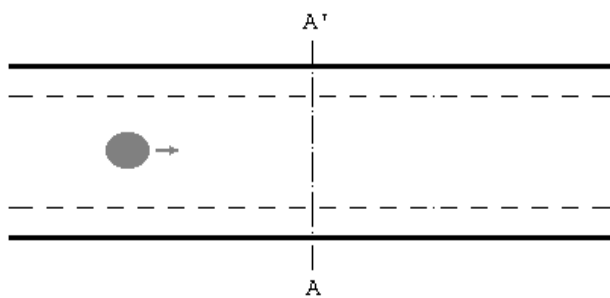


Рис.5. Ускоряющая система с рекуперацией

синхронизацию перемещений ускоряющей волны и ускоряемого сгустка. Изменение J вдоль оси x может быть получено подходящим изменением вдоль оси x ширины пространства дрейфа, или ширины зазора, ускоряющего электроны. Помимо ускоряющей системы, изображенной на рис.1, возможен вариант с рекуперацией энергии электронов (рис.5).

Если считать, что изображенные на рис.5 электроды – диски, то в такой системе возможно инжектировать тороидальный ионный сгусток и ускорять ионы, схлопывая сгусток в направлении к оси AA' .

Для продолжительного ускорения ионного сгустка перепадом потенциала на границе между различными состояниями электронного пучка при малом заряде сгустка достаточно обеспечить его продольную и поперечную устойчивость. Для случая, когда состояние без ВК поглощает состояние с ВК, нетрудно показать, что продольная устойчивость имеет место, если равновесная частица сгустка находится у подножия перепада потенциала, очевидна также поперечная устойчивость ускоряемого сгустка.

При увеличении заряда ускоряемого сгустка он начинает влиять на скорость перемещения перепада. Чем больше заряд сгустка, тем больше скорость поглощения состояния с ВК состоянием без ВК. Как показывает моделирование данной ситуации с помощью простейшей активной линии, нагруженной неоднородностью [11], можно полагать, что в нашем случае добавка к скорости движения перепада пропорциональна произведению величин градиента потенциала и плотности электронов в центре сгустка. Поскольку плотность электронов в состоянии с ВК больше, максимум добавки к скорости перепада должен иметь место ниже максимального градиента потенциала. Отсюда следует, что вместе с продольной устойчивостью ускоряемого сгустка имеет место и устойчивость системы ускоряемый сгусток – ускоряющая волна.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Г. Лымарь., В.В. Беликов, А.В. Звягинцев, В.И. Приступа, Н.А. Хижняк // *Открытия и изобретения* 1990. №36. с.290.
2. Э. Скотт // *Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике*. М: «Советское радио», 1977.
3. А.Г. Лымарь, А.В. Звягинцев, Н.А. Хижняк : Препринт ХФТИ 88-1, 1988.
4. В.Р.Бурсиан, В.И.Павлов // *ЖРФХО*. 1923, т.55, с.71.
5. С.Е. Fay, A.L. Samuel, Shockley W. // *The Bell System Techn. J.* 1938, vol.17, № 1, p.49.
6. С.К. Birdsall, W.B. Bridges // *J.Appl.Phys.* 1961, vol.32, №12, p.2611.
7. С.К. Birdsall, W.B. Bridges // *J.Appl.Phys.* 1963, vol.34. №10, p.2946.
8. А.П. Приверзнецев, Н.И. Саблин, Г.П. Фоменко // *РЭ*. 1989, т. 34, №3, с.659.
9. P.G. O'Shea, W.W. Destler, J. Rodgers, Z. Segalov // *APL*. 1986, vol.49, №25, p.1696.
10. J.S. Luse, H.L. Sahlin. // *IEEE Trans.* 1973, v. NS-20, №3, p. 336.
11. А.Г. Лымарь: Препринт ХФТИ 82-19. 1982.