

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

А.Г. Лымарь, Л.А. Бондаренко, А.М. Егоров

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: lymar@kipt.kharkov.ua

Приведены первые результаты исследований особенностей поведения виртуального катода, образуемого ленточным электронным пучком (ЭП), который движется в сильном продольном магнитном поле в пространстве между параллельными проводящими пластинами. Определена зависимость первеанса электронного пучка, при котором возникает виртуальный катод, от толщины пучка. Показана возможность реализации ускоренного перемещения потенциальной ямы, образованной виртуальным катодом, с помощью изменения во времени первеанса инжектируемого электронного пучка. Полученные результаты позволяют считать, что в исследуемом устройстве возможна реализация ускорения ионов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые эффект коллективного ускорения ионов в электронных пучках был открыт экспериментально при исследовании свойств диодов с плазменным эмиттером [1-3].

В электронном пучке на выходе из диода были обнаружены ускоренные ионы с энергией, превышающей во много раз энергию электронов пучка. В этих работах на сравнительно простых и дешевых установках были получены протоны с энергией 4...5 МэВ и ионы углерода с энергией 10...20 МэВ.

В процессе исследований было обнаружено, что ускорительный процесс не сводится к тривиальному ускорению ионов разностью потенциалов, так как ЭП и ускоренные положительные ионы движутся совместно в одном направлении. Совместность движения ионов подтверждается тем, что энергии ионов не зависят от кратности их зарядов, а максимальные скорости разных ионов не зависят от их массы.

Немного позже были обнаружены ускоренные ионы при инжекции релятивистских электронов в нейтральный газ [4].

Большое количество исследований, направленных на выяснение возможностей действующих схем ускорения и механизмов ускорения ионов, говорит о важности и незавершенности этого направления [5].

Приведенные выше особенности процесса ускорения позволяют предположить, что ионы ускоряются потенциальной ямой и этой ямой является виртуальный катод (ВК).

В связи с этим нами начаты исследования особенностей поведения ВК, которые могут быть использованы для ускорения ионов.

2. ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Использованная нами для исследования поведения ВК модель представлена на Рис.1. Она состоит из прямоугольного заземленного проводящего короба, изображенного утолщенной линией. Его размеры: L – вдоль оси X , $2h$ – вдоль оси Y , вдоль оси Z он неограничен. Пунктирными линиями показаны границы ЭП, его толщина (размер вдоль оси Y) – $2d$.

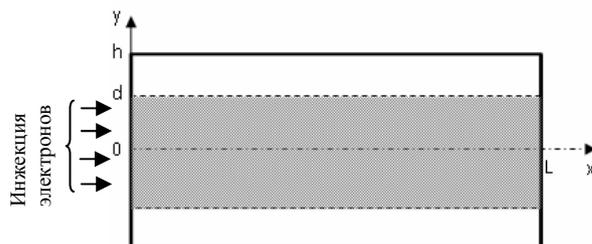


Рис.1. Схема исследуемой модели

Инжекция электронов производится сквозь левую стенку. Предполагается, что траектории электронов параллельны оси X (короб помещен в сильное однородное магнитное поле, силовые линии которого направлены вдоль оси X). В момент инжекции электроны равномерно распределены вдоль толщины ЭП. При моделировании движения использовался метод макрочастиц.

3. ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОГО ПЕРВЕАНСА ОТ d/h

Первоочередными задачами исследований были: 1) расчет зависимости значения первеанса, при котором возникает ВК, от отношения d/h и 2) сравнение результатов расчета с результатами численного моделирования.

Аналитический расчет производился в предположении, что вдоль оси X $\partial U / \partial x = 0$, где $U(x,y)$ – потенциал, создаваемый ЭП в пространстве дрейфа.

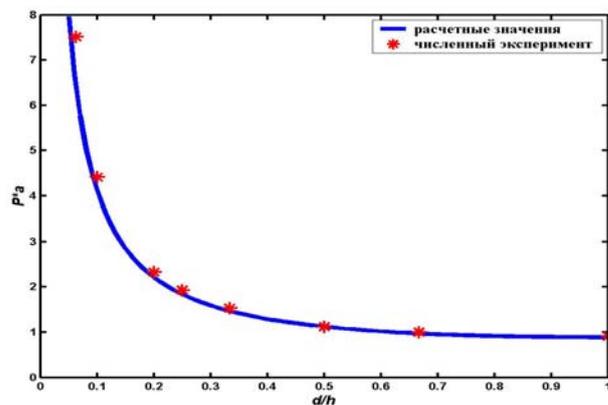


Рис.2. Зависимость критического значения первеанса от отношения поперечных размеров ЭП и короба

Рис.2 демонстрирует малое отличие величин, полученных расчетом (сплошная линия), и в результате численного эксперимента (звездочки). Этим подтверждается правильность теоретических расчетов и работы программы численного моделирования.

4. ПОВЕДЕНИЕ ВК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПЕРВЕАНСА ЭП

Выше уже было упомянуто предположение, что в электронном пучке ионы ускоряются движущейся потенциальной ямой и этой ямой является ВК. Ниже приводятся первые результаты численных исследований, подтверждающих возможность управления скоростью перемещения ВК.

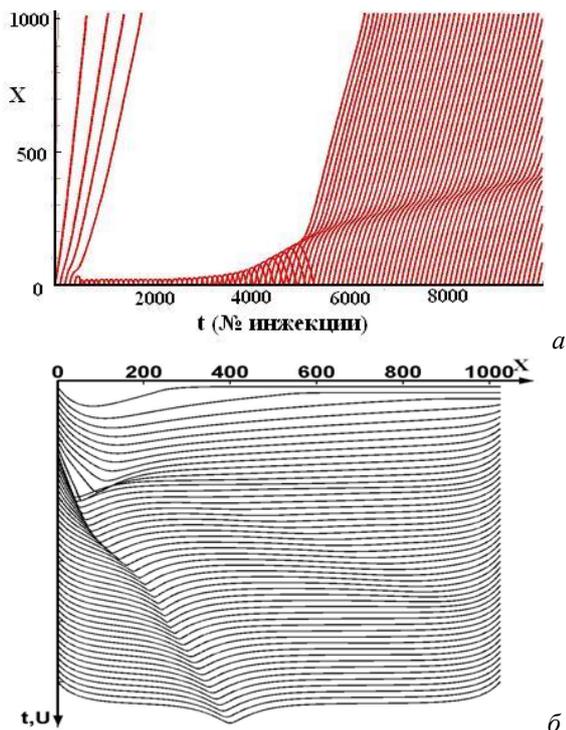


Рис.3. Зависимость характеристик ЭП от времени.

Здесь и дальше на рисунках: а – траектории отрицательно заряженных макрочастиц с координатой $y=0$; б – линии распределения электрического потенциала на оси ЭП ($0 < x < L$, $y=0$), зарегистрированные в моменты времени, выбранные с постоянным шагом. На Рис.3,б: чем ниже кривая, тем позже момент ее регистрации

На Рис.3 представлены характеристики ЭП при следующих параметрах: $d/h = 1/4$; с 2000-й инжекции по 4000-ю первеанс пучка уменьшался за счет уменьшения заряда инжектируемого ЭП с $2 \cdot Q_{ВК}$ до $0,9 \cdot Q_{ВК}$ по линейному закону ($Q_{ВК}$ – величина инжектируемого заряда ЭП, при которой образуется ВК; скорость ЭП в момент инжекции $V_{инж.} = 1$); После 4000-й инжекции первеанс инжектируемого ЭП оставался постоянным и меньшим значения, при котором может образоваться ВК. Рис.4 описывает ситуацию, которая имеет место при неизменном заряде инжекции и уменьшении первеанса за счет увеличения $V_{инж.}$ от 1 до 1,12 по линейному закону на интервале [2000...4000]. После 4000-й инжекции первеанс остается постоянным.

Рис.3,б и 4,б показывают, что независимо от того, чем достигается уменьшение первеанса, после ликвидации ВК (нет возврата траекторий) остается возмущение потенциала в виде солитона, который удаляется от места инжекции с постоянной скоростью. Вычисления показывают, что эта скорость зависит только от величины уменьшения первеанса.

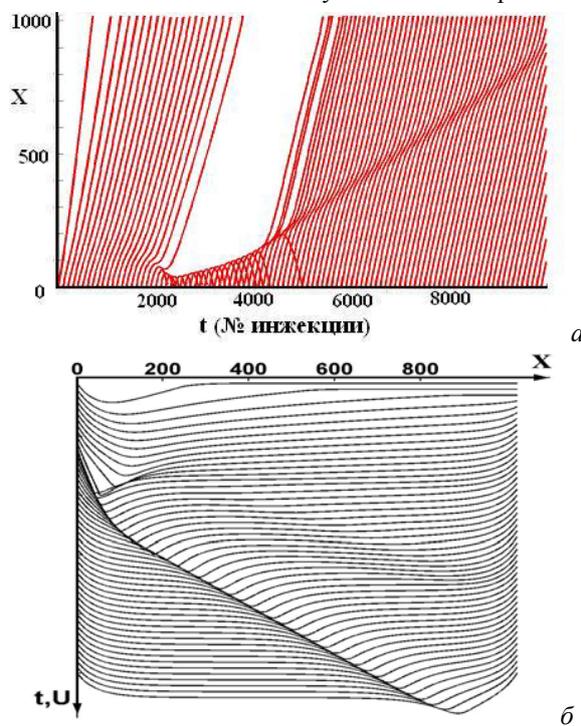


Рис.4. Зависимость характеристик ЭП от времени при изменении скорости инжекции

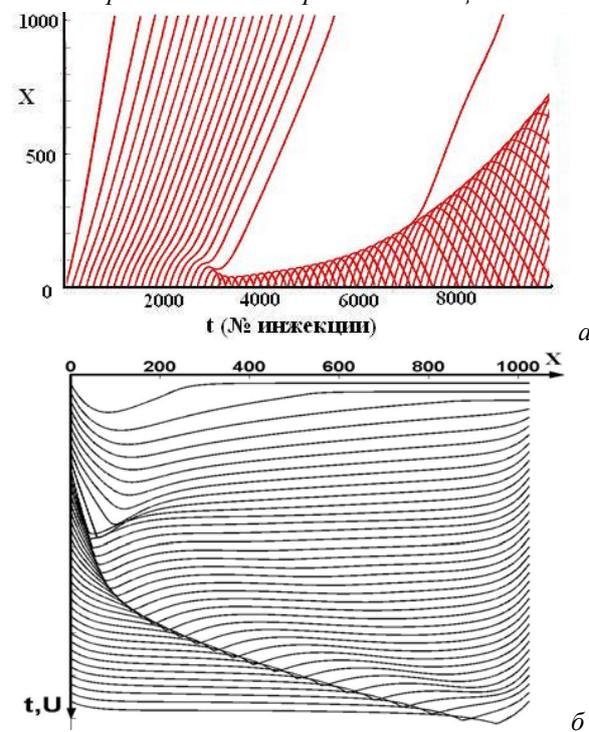
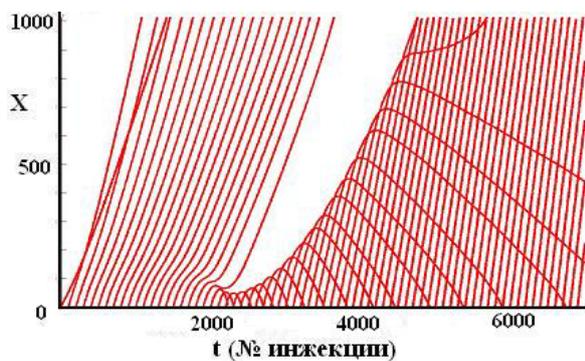
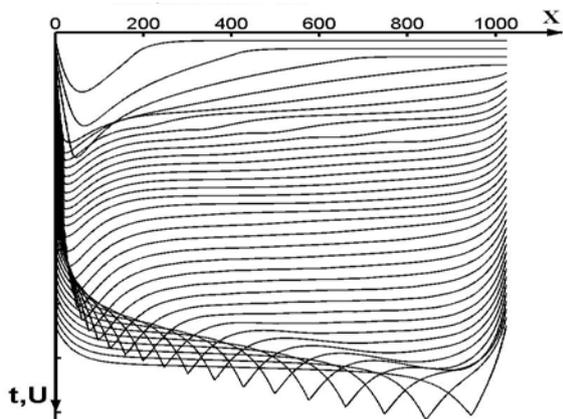


Рис.5. Зависимость характеристик ЭП от времени. Уменьшение заряда от $1,2 \cdot Q_{ВК}$ до $0,3 \cdot Q_{ВК}$ с 2000-й инжекции

Рис.5-7 демонстрируют возможность реализации ускоренного перемещения ВК практически на всей длине модели.

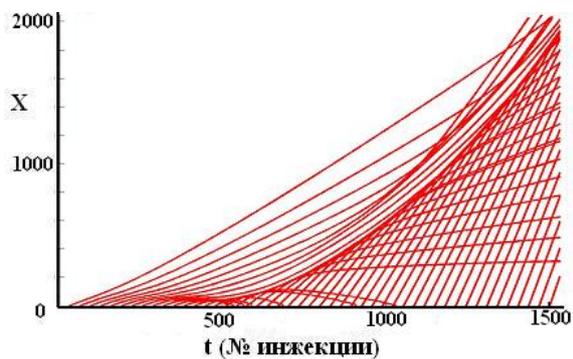


a

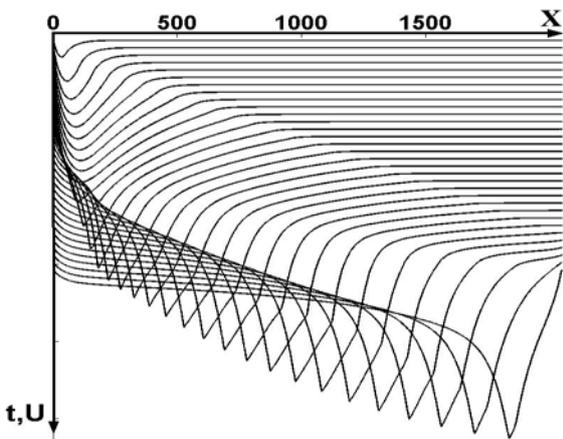


б

Рис.6. Зависимость характеристик ЭП от времени (начальная скорость инжекции равна единице). Увеличение скорости инжектируемых электронов с момента образования ВК происходит по линейному закону

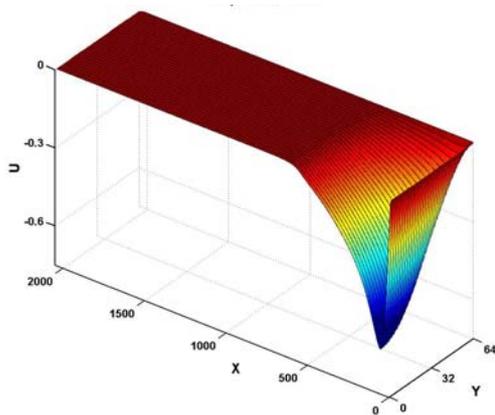


a

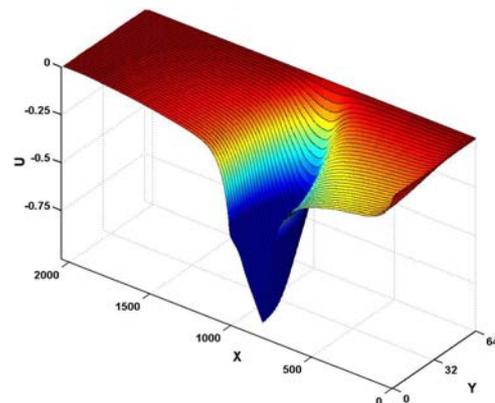


б

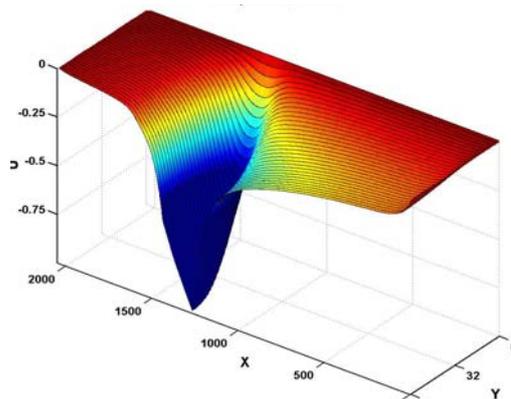
Рис.7. Зависимость характеристик ЭП от времени. Начальная скорость инжекции равна единице, начиная с 400-й инжекции начальная скорость увеличивается на 0,005 при каждой инжекции



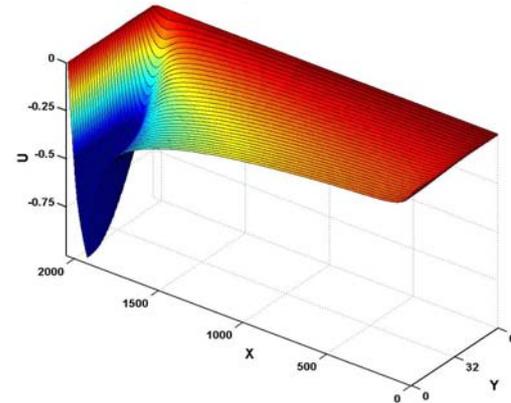
a



б



в



г

Рис.8. Зависимость характеристик ЭП от времени. Начальная скорость инжекции равна единице, начиная с 400-й инжекции скорость увеличивается на 0,005: а) – 396-я; б) – 1115-я; в) – 1315-я; г) – 1515-я инжекция

ВЫВОДЫ

Разработан вариант программы для численного моделирования поведения виртуального катода в электронном потоке. Получены первые результаты исследований особенностей поведения виртуального катода, образованного электронным пучком, который движется в сильном продольном магнитном поле в пространстве между параллельными проводящими пластинами. Определена зависимость первеанса электронного пучка, при котором возникает виртуальный катод, от толщины пучка. Показана возможность реализации ускоренного перемещения потенциальной ямы, образованной виртуальным катодом, изменением во времени первеанса инжектируемого пучка электронов. Полученные результаты позволяют считать, что в исследуемом устройстве возможна реализация ускорения ионов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.А. Плюто, П.Е. Беленсов, Е.Д. Короп, Г.П. Мхеидзе, В.Н. Рыжков, К.В. Суладзе, С.М. Темчин. Ускорение ионов в электронных пучках // *Письма в ЖЭТФ*. 1967, в.6, с.540-541.

2. Е.Д. Короп, А.А. Плюто. Ускорение ионов катодного материала при вакуумном пробое // *ЖТФ*. 1970, т.40, с.2534-2537.
3. А.А. Плюто, К.В. Суладзе, С.М. Темчин, Е.Д. Короп. Ускорение ионов в электронном пучке // *Атомная энергия*. 1969, т.27, №5, с.418-423.
4. П.Е. Беленсов. Комментарий к статье "Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом" // *УФН*. 2004, т.174, №2, с.221-223.
5. S.E. Graybill, I.K. Uglum. Observation of energetic ions from a beam generated plasma // *J. of Appl. Phys.* 1970, v.41, №1, p.326-340.
6. А.Е. Дубинов, Ю.И. Корнилова, В.Д. Селемир. Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом // *УФН*. 2002, т.172, №11, с.1226-1246.

Статья поступила в редакцию 22.12.2011 г.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF IONS ACCELERATION BY VIRTUAL CATHODE

A.G. Lymar, L.A. Bondarenko, A.M. Yegorov

The first results of studies of the behavior of the virtual cathode formed in the ribbon electron beam, which moves in a strong longitudinal magnetic field in the space between two parallel conducting plates: the dependence of the perveance of the electron beam, in which there is a virtual cathode, the thickness of the beam; the possibility of implementing an accelerated movement of the potential well formed by the virtual cathode, the time variation of the perveance of the injected electron beam. The results obtained suggest that in the test device can be implemented to accelerate the ions.

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПРИСКОРЕННЯ ІОНІВ ВІРТУАЛЬНИМ КАТОДОМ

A.G. Лимар, Л.А. Бондаренко, О.М. Єгоров

Наведено перші результати досліджень особливостей поведінки віртуального катода, утвореного в стрічковому електронному пучку, що рухається у сильному поздовжньому магнітному полі в просторі між паралельними провідними пластинами. Визначена залежність первеанса електронного пучка, при якому виникає віртуальний катод, від товщини пучка. Показана можливість реалізації прискореного переміщення потенційної ями, утвореної віртуальним катодом, зміною у часі первеанса інжектуемого електронного пучка. Отримані результати дозволяють зробити висновки, що в досліджуваному пристрої можлива реалізація прискорення іонів.