

ПРОГРАММА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ

С.А. Пустовойтов, В.А. Батулин, С.А. Ерёмин, А.Ю. Карпенко
Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина
E-mail: baturin@ipflab.sumy.ua

Представлены физическая модель и алгоритм компьютерной программы, используемые для численного моделирования системы извлечения и первичного формирования ионного пучка в плазменном ионном источнике. Для сравнения результатов численного моделирования и экспериментальных измерений границы плазмы промоделирована система извлечения импульсного ионного источника с осцилляцией электронов в магнитном поле. Показано хорошее соответствие между расчётными и экспериментальными результатами.

Конструирование мощных источников заряженных частиц является актуальной физико-технической задачей. Одним из наиболее перспективных методов получения ионного пучка можно считать вытягивание его ускоряющим электрическим полем из холодной плазмы. При расчете системы извлечения ионного пучка в плазменном источнике ионов использовалась следующая физическая модель:

1. Граница плазмы, которая считается резкой, служит эмиттером ионов.

2. Ускоряющее электрическое поле создаётся системой электродов и искажается собственным полем пространственного заряда пучка, которое для мощных пучков может быть достаточно сильным.

3. Для вычисления объёмного заряда, создаваемого ионным пучком, используется дискретная модель потока частиц в виде траекторий – трубок тока [3].

Суммарное электрическое поле, в свою очередь, определяет форму эмиттера и, как следствие, форму пучка. Для их нахождения необходимо решить самосогласованную задачу. Ограничиваясь рамками стационарного режима, можно допустить, что на эмиттере приближенно выполняется условие равенства нулю нормальной составляющей электрического поля. Это условие может реально выполняться лишь при учёте влияния пространственного заряда [1].

С учётом вышесказанного, для нахождения потенциала и траекторий ионов требуется решить систему уравнений:

1. Уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{\rho}{\varepsilon} = 0.$$

2. Уравнение Лоренца:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}).$$

3. Закон сохранения заряда:

$$\text{div } \vec{j} = 0.$$

Эти уравнения образуют замкнутую систему. В большинстве случаев такая система уравнений не может быть решена аналитически, и поэтому используются итерационные методы.

Для решения этой задачи (аксиально-симметричный случай) была написана компьютерная программа в среде Delphi. Исходными данными являются: размеры, форма и потенциалы электродов (задаются в каком-либо графическом редакторе), первоначальное положение и потенциал плазмы, средняя температура и масса ионов, распределение плотности тока по радиусу, величина полного извлекаемого тока. Структурная схема программы для моделирования извлечения пучка ионов из плазмы показана на Рис. 1.

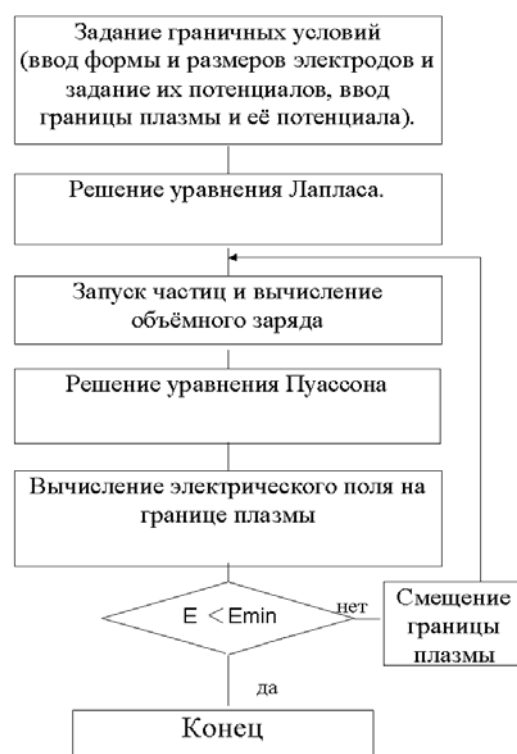


Рис. 1. Структурная схема программы для моделирования извлечения пучка ионов из плазмы

Для решения уравнений Лапласа и Пуассона используется метод конечных разностей [2]. Расчётная область покрывается квадратной сеткой, в каждом узле которой находится значение потенциала. Количество узлов сетки 156000.

Для определения положения границы плазмы в области формирования ионного пучка итерацион-

ный процесс идёт до тех пор, пока электрическое поле E на границе плазмы не будет меньше заданного значения E_{\min} .

Результатом работы программы является графическое изображение формы и положения границы плазмы, формы извлекаемого пучка и эквипотенциальных линий с заданным потенциалом, график плотности тока в пучке от радиуса, диаграмма и значение среднеквадратичного эмиттанса.

Для сравнения результатов численного моделирования и экспериментальных измерений границы плазмы была промоделирована система извлечения ионного источника, описанная в [4]. В этой работе исследовалась проникающая плазма, генерируемая импульсным ионным источником с осцилляцией электронов в магнитном поле. Разряд происходил в среде водорода. Плазма из ионного источника через выходное отверстие диаметром 3 мм могла проникать в область иммерсионной линзы, состоящей из двух цилиндров. Положение и форма границы плазмы измерялись при помощи двух подвижных цилиндрических зондов. К сожалению, в работе нет данных о массовом составе, полном токе извлекаемых ионов и профиле плотности тока, которые необходимы для численного моделирования. В связи с этим, при моделировании предполагалось, что из плазмы извлекаются исключительно протоны, полный ток задавался в интервале 50...100 мА, а зависимость плотности тока от радиуса системы находилась методом подбора.

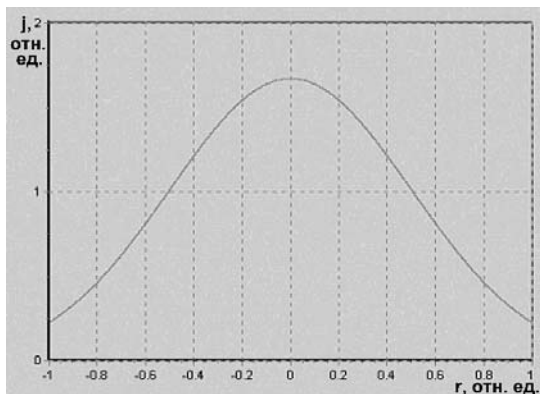


Рис.2. Зависимость плотности извлекаемого тока от радиуса системы

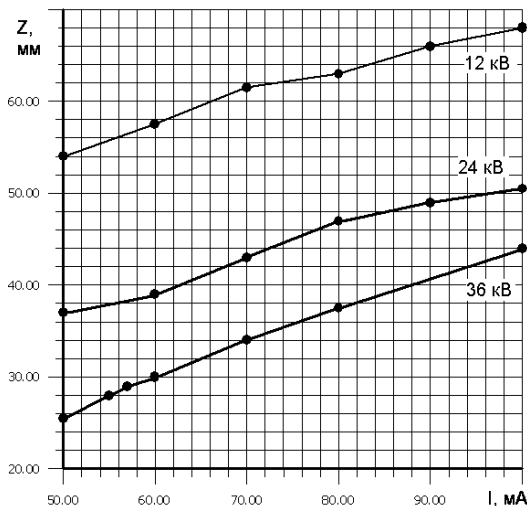


Рис.3. Зависимость расстояния z между выходным

отверстием источника и границей плазмы на оси системы от полного тока пучка при различных извлекающих напряжениях

График зависимости плотности извлекаемого тока от радиуса, при которой результаты моделирования границы плазмы наиболее точно совпали с результатами измерений, показан на Рис.2.

На Рис.3 представлены результаты моделирования расстояния z между выходным отверстием источника и границей плазмы на оси системы от полного извлекаемого ионного тока при различных значениях извлекающего напряжения.

Совпадение данных измерения и результатов компьютерного моделирования расстояния z при различных значениях $U_{\text{извл.}}$ наблюдалось при значениях полного извлекаемого ионного тока I , представленных в таблице.

$U_{\text{извл.}}$, кВ	12	24	36
Z_z , мм	56	43	38
I , мА	56	70	82

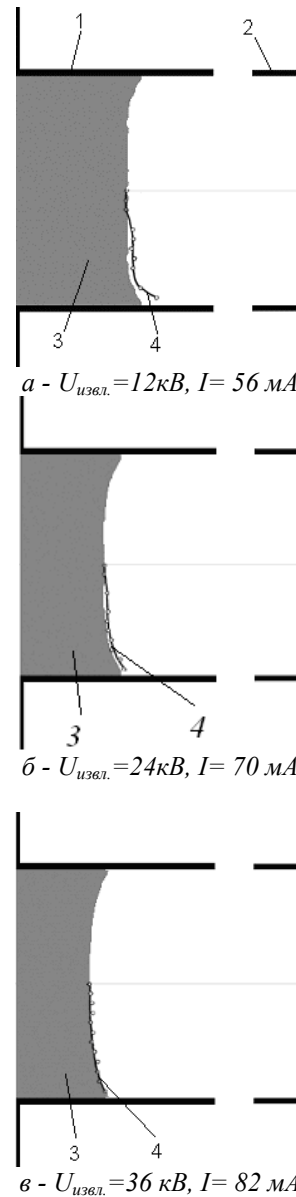


Рис.4. Смоделированная и экспериментально измеренная топография границы плазмы для

значений, приведенных в таблице: 1 - экспандер; 2 - извлекающий электрод; 3 - смоделированная область плазмы; 4 - измеренная граница плазмы

Так как параметры плазмы в области выходного отверстия не зависят от значения $U_{\text{извл}}$ [4], рост полного тока I можно объяснить тем, что при смещении границы плазмы к эмиссионному отверстию растет ее плотность, что и приводит к увеличению вытягиваемого ионного тока.

На Рис.4 приведена смоделированная и экспериментально измеренная топография границы плазмы для значений, приведенных в таблице. Видно хорошее соответствие между расчётными и экспериментальными результатами. Таким образом, данная методика может эффективно использоваться при расчётах, связанных с разработкой мощных ионных источников, и оптимизации систем извлечения и формирования пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.И. Бортничук, Г.П. Прудковский, В.А. Хотин, А.В. Хотина. Моделирование электронно-оптических систем с плазменным эмиттером // *ЖТФ*. 1977, т.47, в.9, с.1894-1903.
2. С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. *Интенсивные электронные и ионные пучки* / 2-е изд., перераб. и доп. М.: «Энергоатомиздат», 1991, с.304.
3. В.Я. Иванов. *Методы автоматизированного проектирования приборов электроники. Часть II. Методы математического моделирования задач электронной оптики*. Новосибирск, 1986, с.184.
4. М.Д. Габович, Л.Л. Пасечник, Л.И. Романюк. Граница проникающей плазмы и плазменная фокусировка // *ЖТФ*. 1961, т.31, в.1, с.87-93.

Статья поступила в редакцию 08.05.2008 г.

THE PROGRAM FOR NUMERICAL MODELLING OF THE ION BEAM EXTRACTION SYSTEM IN THE PLASMA ION SOURCE

S.A. Pustovoytov, V.A. Baturin, S.A. Yeryomin, A.J. Karpenko

The physical model and the algorithm of the computer program used for numerical modelling of extraction and primary formation system of an ion beam in a plasma ion source are submitted. For comparison of results of numerical modelling and experimental measurements of plasma border a system of extraction of a pulse ion source with electron oscillations in a magnetic field was simulated. Good conformity between calculated and experimental results is shown.

ПРОГРАМА ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВИТЯГУ ІОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕНОМУ ДЖЕРЕЛІ ІОНІВ

С.О. Пустовойтов, В.А. Батурін, С.О. Єрьомін, А.Ю. Карпенко

Представлено фізичну модель і алгоритм комп'ютерної програми, використовувані для чисельного моделювання системи витяги і первинного формування іонного пучка в плазменому іонному джерелі. Для порівняння результатів чисельного моделювання і експериментальних вимірів границі плазми промодельовано систему витягу імпульсного іонного джерела з осциляцією електронів у магнітному полі. Показано гарну відповідність між розрахунковими і експериментальними результатами.