

УДК 533.9.004

А.М. Жукешов

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

E-mail: zhukeshov@physics.kz

Особенности ускорения плазмы в коаксиальной пушке при работе со сплошным наполнением

Аннотация. Теоретически и экспериментально исследован процесс ускорения потока плазмы в импульсной пушке с коаксиальной геометрией электродов. Численный расчет проведен на основе модели двухкомпонентной блочной плазмы при условии сплошной среды с разной плотностью. Проведено сравнение расчетных данных с результатами экспериментов на ускорителе КПУ-30. Показано, что структура потока существенно зависит от плотности плазмы, определяемой начальным рабочим давлением.

Ключевые слова: импульсная пушка, плазма, численное моделирование, импульсный плазменный ускоритель.

Введение

Плазменные потоки, формируемые сильно-точными импульсными ускорителями большой мощности, широко применяются в различных физических и технологических установках. Несмотря на довольно простую схему устройства, динамика плазмы в канале ускорителя сложным образом зависит как от условий эксперимента, так и от геометрии электродной системы. В связи с этими причинами на сегодняшний день не существует теоретической модели, адекватно описывающей все процессы в канале ускорителя. Поведение плазмы в межэлектродном пространстве зависит не только от динамики ионизованного газа, но и от таких важных процессов, как эмиссия с поверхности электродов и состояние самой поверхности.

Подробные исследования работы импульсных плазменных ускорителей, проведенные в [1, 2] показали, что для этих ускорителей существует «критическая» величина тока $J_{кр}$, при достижении которого происходит резкий рост напряжения на разряде и наблюдается изменение формы ВАХ ускорителя. При этом в ускорителе раскачиваются колебания большой амплитуды. Этот результат авторы связывают с влиянием эффекта Холла при течении плазмы поперек магнитного поля, приводящего к возникновению продольной компоненты электрического поля, из-за чего и происходит перестройка структуры

разряда. А.И. Морозов на основе анализа ускорения плазмы в магнитном поле показал, что проявление эффекта Холла возможно при достаточно высокой плотности газа, когда выполняется условие квазинейтральности плазмы [3]. Дальнейшие эксперименты [4], проведенные на ускорителях «КСПУ», свидетельствуют, что влияние эффекта Холла приводит к сжатию плазмы в сторону одного из электродов и выносу тока за срез электродов.

В связи с этим представляет интерес исследовать работу плазменного ускорителя в режиме со сплошным наполнением. В этом режиме рабочий газ заполняет рабочую камеру при заданном начальном давлении, что предоставляет возможность варьировать в широких пределах плотность формируемой плазмы. Этот режим позволяет получать ионно-плазменные потоки определенного состава, что перспективно для различных технических и технологических применений плазменных ускорителей [5-8]. В данной работе проведена диагностика плазменного потока, формируемого при различных начальных давлениях и разрядных напряжениях на импульсном плазменном ускорителе КПУ-30.

Экспериментальная установка

Ускоритель КПУ-30 используется как для апробации вновь разрабатываемых диагностических

методик, так и для модификации поверхности материалов. Ускоритель имеет цилиндрические электроды из меди длиной 45 см, диаметр внешнего электрода – 9 см, внутреннего – 3 см. В отличие от стандартного «коаксиала», у которого центральный электрод близок по длине к наружному, в данном ускорителе внутренний электрод

на 5 см короче внешнего и имеется буферный объем в начале электродов. Накопительная система состоит из 25 конденсаторов ИК-50-3 с рабочим напряжением 50 кВ, суммарной емкостью 75 мкФ. Рабочим газом являлся воздух, который оставался в камере после откачки до рабочего давления.

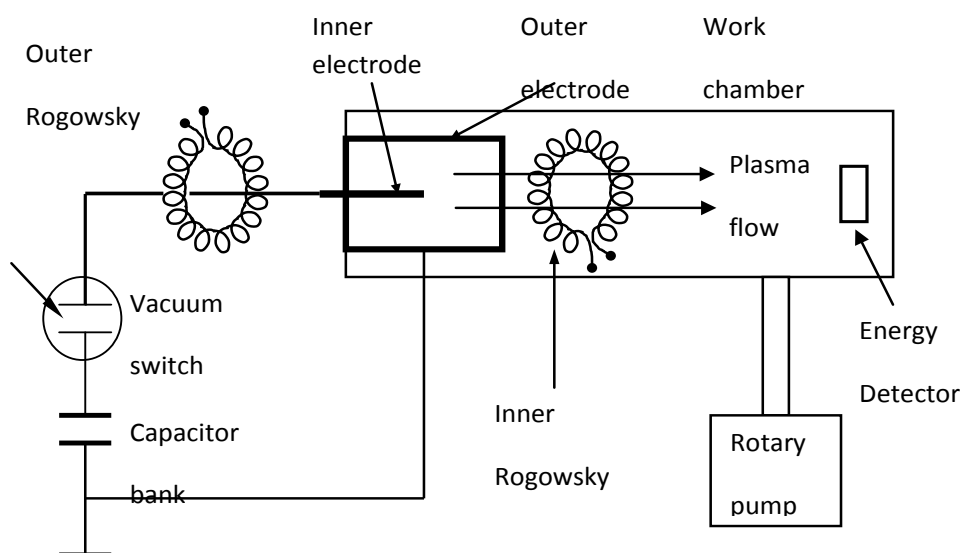


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки КПУ-30

Для исследования применяли пояса роговского с различным количеством витков, свернутых в виде колец и установленных снаружи на разрядной шине и внутри ускорителя в плоскости, перпендикулярной к направлению плазменного потока. В случае внешнего пояса измеряемый ток соответствует разрядному току конденсаторов, а в случае внутреннего – току в плазме. Схема эксперимента показана на рис. 1. Для регистрации сигнала с поясов использовали запоминающий осциллограф 200 МГц, сигнал подавали через экранированный омический делитель на вход осциллографа по коаксиальному кабелю 50 Ом.

Численное моделирование

Рассмотрим поведение двухкомпонентной плазмы, состоящей из электронного и ионного блоков в скрещенных электрическом и магнитном полях, с учетом квазинейтральности плазмы. Последнее обстоятельство учтем, введя продольную компоненту электрического поля, возникающую в результате сдвига блоков относительно друг друга за счет разности масс и зарядов ионов и электронов, как показано в [9].

Уравнения, описывающие движения центров тяжести ионного и электронного блоков, а также x -компоненты электрического поля, направленной вдоль оси электродной системы, имеют вид:

$$M \frac{dV_{ix}}{dt} = eE_x + \frac{e}{c} B_0 V_{iy}; \quad M \frac{dV_{iy}}{dt} = eE_0 - \frac{e}{c} B_0 V_{ix};$$

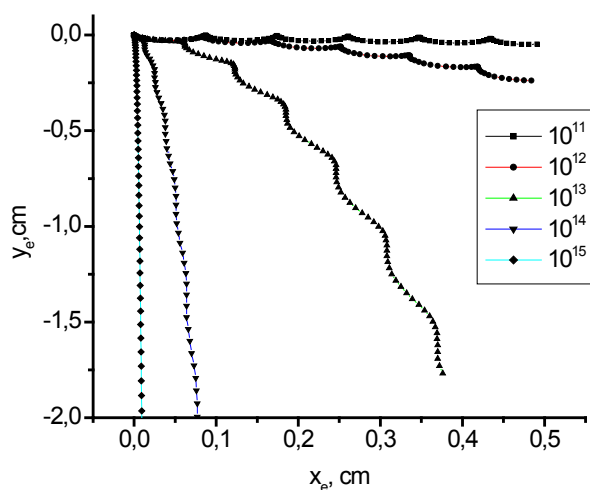
$$m \frac{d\mathcal{G}_{ex}}{dt} = -eE_x - \frac{eB_0}{c} \mathcal{G}_{ey}; \quad m \frac{d\mathcal{G}_{ey}}{dt} = -eE_0 - \frac{eB_0}{c} \mathcal{G}_{ex};$$

$$E_x = 4\pi en_0(x_e - x_i).$$

Численное решение данной системы линейных уравнений проводили в среде MathCAD7 с учетом следующих начальных условий: напряжение на разряде 20 кВ, величина магнитного поля 0,2 Тл, начальная скорость частиц равна нулю. Величина магнитного поля и другие параметры для КПУ-30 были определены ранее с применением зондовых методов [10, 11]. Исследовали зависимость траектории частиц от концентрации n , соответствующему рабочему давлению 0,05-1 торр.

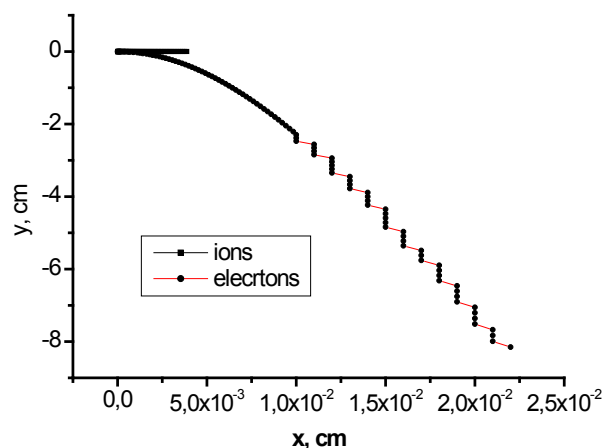
Расчеты показали, что при очень малой

плотности плазмы ($n \rightarrow 0$) ионы и электроны двигаются во взаимно перпендикулярных направлениях относительно аксиальной оси. Учитывая размер межэлектродного пространства (ширина 2 см., длина 45 см.), можно сказать, что движение частиц происходит фактически независимо. Другая картина для траектории частиц наблюдается при больших n , когда реализуется квазинейтральность. На рис. 2а показаны траектории электронов при различных концентрациях. При концентрации ниже 10^{12} движение электронов, также, как и в предыдущем случае, происходит по циклоиде вдоль оси x . Далее с ростом концентрации электро-



а

ны начинают уходить далеко вдоль y , а движение ионов в этом направлении затруднено из-за влияния электрического поля электронов (рис. 2б). Таким образом, в этом случае функцию создания тока в межэлектродном пространстве берут на себя электроны, а ионы являются «чисто инерционным» компонентом системы. Это приводит к тому, что ускорение ионов осуществляется возникающим в межэлектродном пространстве продольным (вдоль x) электрическим полем, которое называют «холловским». Происходит это следующим образом. В начале процесса скорость ионов мала, электроны их обгоняют и тянут за собой.



б

Рисунок 2 – Траектории электронов в (а) и ионов (б) при различных концентрациях

Наоборот, на стадии торможения электроны отстают и тянут ионы в обратную сторону. Но средние скорости дрейфа вдоль y ионов и электронов, очевидно, одинаковы при любой плотности. В результате, в ускорителе должны наблюдаться продольные колебания тока большой амплитуды. Период этих колебаний, очевидно, определяется амплитудой внешнего электрического поля.

Итак, численные расчеты показывают, что поведение частиц в межэлектродном пространстве плазменного ускорителя определяется рабочим давлением или плотностью плазмы. При низкой плотности, когда условие квазинейтральности не играет существенной роли, движение частиц должно происходить независимо. Динамика частиц в плотной плазме определяется самосогласованным холловским полем. Величина концен-

трации, выше которой следует учитывать это самосогласованное поле, составляет 10^{11} - 10^{12} см^{-3} .

Выводы

Эксперименты показывают, что при вариации начального рабочего давления в пределах 0,05 - 1 Торр динамика плазмы существенно изменяется. Существует критическое значение начальной плотности газа (порядка 10^{16} см^{-3}), при достижении которого происходит перестройка структуры разряда. Выше этой плотности в канале ускорителя формируется поток, состоящий из слоев с радиально-аксиальным направлением линий тока, ниже этой плотности формируется поток с диффузным распределением тока.

На основании полученных данных наблюдаемые экспериментальные результаты можно

объяснить следующим. При малых рабочих давлениях электроны двигаются в сторону выхода электродов с дрейфовой скоростью пропорциональной E/N . **В то же время ионы из-за большого ларморовского радиуса и действия электрической силы вынуждены дрейфовать в межэлектродном пространстве вслед за электронами в продольном направлении.** В результате, в канале ускорителя происходят продольные колебания плазмы. Динамика этих колебаний, естественно, определяется внешним электрическим полем, т.е. напряжением на электродах. Влияние эффекта Холла на течение плазмы в коаксиале приводит к скольжению линий тока вдоль электродов, выносу разрядного тока на десятки сантиметров и формированию четкой области компрессии.

При высоком давлении картина существенно меняется, потому что продольное смещение становится незначительным. В этом случае ускорение плазмы происходит в основном за счет силы Ампера. Это и приводит к радиальному распределению линий тока в канале ускорителя.

Установленные особенности формирования потока могут быть использованы для создания источников заряженных ионов достаточно больших энергий. Кроме этого, указанные эффекты возможно использовать для электронно-ионной обработки материалов в технологиях производства материалов с заданными свойствами.

Литература

1 Плазменные ускорители / под ред. Л.А. Арцимовича. – М.: Машиностроение, 1973. – 312 с.

2 Физика и применение плазменных ускорителей / под ред. А.И. Морозова – Минск: Наука и техника, 1974. – 399 с.

3 Морозов А. И. К теории электромагнитных процессов при наличии эффекта // ЖЭТФ. – 1964. – Т.46. – С. 710-721.

4 Асташинский В. М. Исследование физических процессов, обуславливающих режимы работы КСПУ // Физика плазмы. – 1992. – Т.18, №1. – С. 90-98.

5 Tereshin V.I. Pulsed plasma accelerators of different gas ions for surface modification // Rev. Sci. Instrum. – 2002. – Vol. 73(2). – P.831-833.

6 Piekoszewski J. Pulse ion implantation – new single doping technique // Phys. Status Solidi. – 1981. – Vol. 67. – P.163–167.

7 Погребняк А. Д. Структура и свойства твердого сплава, нанесенного на медную подложку с помощью импульсно-плазменной технологии // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, вып. 7. – С. 111-118.

8 Жукешов А. М. Воздействие импульсной плазмы на поверхность конструкционных сталей // Поверхность. – 2006. – №8. – С. 94-97.

9 Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. – М.: Физматлит, 2006. – С. 78-80.

10 Zhukeshov A. M. Measuring the Parameters of Pulsed Plasma Flows by Means of Magnetic Probes // J. Engineering Thermophysics. – 2007. – Vol. 16, №1. – P. 40-43.

11 Baimbetov F. B. Dynamics of Plasma Flow Formation in a Pulsed Accelerator Operating at a Constant Pressure // Tech. Phys. Let. – 2007. – Vol. 33(1). – P.77-80.

Ә.М. Жүкешов

Тұтас толтырумен жұмыс істейтін коаксиалды зеңбіректе плазма үдеуінің ерекшеліктері

Жұмыста электродинамикалық плазма үдеткіштің электродтарының арасында қалыптасатын ағын құрылымын зерттеу нәтижелері ұсынылған. КПУ-30 құрылымы үшін екі компонентті блокты модельді қолдана отырып, санды модельдеу жүргізілген. Ағынның құрылымы бастапқы жұмыс қысымымен белгіленетін плазманың тығыздығына тәуелді екені көрсетілген. Соңында есептеп алынған ақпараттар эксперименталды нәтижелермен салыстырылған.

Түйін сөздер: импульстік зеңбірек, плазма, сандық модельдеу, импульстік плазмалық үдеткіш.

A.M. Zhukeshov

Features of a plasma acceleration in the coaxial plasma gun with gas filling

The results of research of formation of a flow in the electrodynamic plasma accelerator with symmetrical geometry of electrodes are present. The numerical account is carried out on the basis of a two-component block model of plasma in application to the pulse plasma accelerator KPU-30. It is shown, that the structure of a flow essentially depends on density of plasma determined by initial working pressure. The comparison of the received accounts with experimental data of the accelerator carried out.

Keywords: pulse cannon, plasma, numerical simulation, pulse plasma accelerator.