

Государственный научный центр
Российской Федерации
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера СО РАН

В.И. Давыденко, А.А. Иванов,
А.И. Рогозин, Р. Улеманн

ОПТИМИЗАЦИЯ
ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С "ТОЛСТЫМИ" ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ
ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА
АТОМОВ ТОКАМАКА TEXTOR

ИЯФ 96-6

НОВОСИБИРСК
1996

**Optimization of an Ion-Optics System With "Thick"
Electrodes for the Diagnostic Neutral Beam
Injector of the TEXTOR Tokamak**

V.I. Davydenko, A.A. Ivanov, A.I. Rogozin

Budker Institute of Plasma Physics
630090, Novosibirsk, Russia

R. Uhlemann

Institute of Plasma Physics
KfA Juelich, Germany

Аннотация

Spectroscopy of neutral beam induced radiation is widely used in magnetic fusion devices for measurements of density and temperature profiles, studies of plasma turbulence and cross field transport as well as for measurements of the radial profiles of highly ionized impurities. In order to access the plasma core, the diagnostic neutral beam should be of sufficiently high energy and current density. Its transverse dimensions and angular divergence are to be small enough to obtain the required spatial resolution. In this paper the results of the optimization of elementary cell of the ion optics system of the neutral beam injector are considered which is developed for application of beam emission spectroscopy in the TEXTOR tokamak.

E-mail:davydenko@inp.nsk.su

В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведется разработка инжектора пучков атомов водорода для комплекса спектроскопической диагностики примесей во внутренних областях плазменного шнура токамака TEXTOR [1]. Требуемые параметры пучка водорода: энергия 50 кэВ, эквивалентный ток пучка – 1 А, угловая расходимость $\leq 1^\circ$. Источник должен обеспечивать в течение 10 с серию миллисекундных импульсов тока пучка с суммарной длительностью 5 с при паузах между сериями ~ 5 минут. В ионном источнике инжектора плазменный эмиттер будет создаваться индукционным ВЧ-разрядом в неоднородном магнитном поле, а формирование пучка будет производиться четырехэлектродной ионно-оптической системой с круглыми апертурами [2].

Во время формирования пучка электроды ионно-оптической системы подвергаются интенсивной бомбардировке электронами и ионами вторичной плазмы и атомами перезарядки. При длительности пучка несколько секунд нагрев электродов становится значительным, что требует их специального охлаждения во время работы инжектора. Наиболее радикальный способ, применяемый для охлаждения электродов многоапертурных ионно-оптических систем мощных инжекторов, состоит в прокачке воды по специальным каналам, окружающим апертуры (см. например [3,4]). Изготовление с высокой точностью электродов с внутренними каналами охлаждения является технологически весьма сложной задачей. Для диагностического инжектора токамака TEXTOR с импульсной мощностью около 100 кВт, средняя мощность, выделяемая на электродах, вследствие больших интервалов между импульсами оказывается сравнительно небольшой (десятки ватт). Это обстоятельство позволяет применить более простой способ охлаждения электродов. Первая (плазменная) сетка воспринимает тепловую нагрузку в примерно одинаковых долях от частиц пучка и газоразрядной плазмы. Однако, в четырехэлектродной ионно-оптической системе наибольшая тепловая нагрузка приносится вторичными частицами на второй и третий или, соответственно, вытягивающий и ускоряющий электроды. В связи с этим представляется привлекательным вариант ионно-оптической системы, в котором вытягивающий и ускоряющий электроды выполнены из молибдена и имеют достаточно большую толщину, а следовательно и теплоёмкость, так что прирост их температуры за время работы инжектора остается на приемлемом уровне. Электроды за-

креплены на охлаждаемых оправках, что позволяет осуществлять полный теплосъём с электродов в промежутках между импульсами, а также частичный во время импульса инъекции. Предлагаемый вариант ионно-оптической системы представляется существенно более простым по технологии и позволяет использовать высокую электрическую прочность молибдена. Вместе с тем, очевидно, что увеличение толщины электродов влияет на формирование элементарных пучков в ячейках. При длине отверстий в электродах, сравнимой с диаметром, действие фокусирующих поперечных электрических полей электродов на частицы пучка ослабляется. Это должно приводить к появлению добавочной поперечной скорости у ионов и увеличению поперечного размера элементарных пучков под действием поля пространственного заряда. Поэтому для получения приемлемых характеристик сформированного пучка необходима тщательная оптимизация формы электродов. Цель настоящей работы состояла в оптимизации геометрии электродов ионно-оптической системы с увеличенной толщиной вытягивающего и ускоряющего электродов на основе результатов численного моделирования формирования элементарного пучка в ячейке.

Численное моделирование производилось с использованием компьютерного кода AXCEL [6,7]. Для решения уравнения Пуассона в данном коде применяется итерационная процедура. Для заданной геометрии электродов на каждом шаге производится расчет траекторий ионов и их плотности, затем, по вычисленной плотности заряда определяется профиль потенциала, используемый на следующем шаге. Итерации продолжаются до тех пор, пока решение не станет самосогласованным с заданной точностью.

На рис.1 приведены геометрия электродов, напряжения на них и траектории ионов в оптимизированном варианте ионно-оптической системы. Эмиссионная плотность тока в этом варианте составляла 100 mA/cm^2 , содержание водородных ионов в пучке: $\text{H}^+ - 90\%$, $\text{H}_2^+ - 5\%$, $\text{H}_3^+ - 5\%$, потенциал плазмы 10 В , ионная температура $- 0.1 \text{ эВ}$. В принятом варианте для обеспечения прецизионного формирования пучка на начальной стадии на выходной стороне плазменного электрода имеется конический срез с углом 60° , близким к углу Пирса. Наличие этого угла при слегка вогнутой плазменной границе обеспечивает аккуратный вход пучка в отверстие вытягивающего электрода. На выходе вытягивающего электрода диаметр пучка возрастает. Для того, чтобы предотвратить попадание ионов на электрод в выходной части отверстия в нем имеет коническое расширение. Возрастание диаметра пучка объясняется тем, что вследствие повышенной длины канала в вытягивающем электроде и сравнительно малой скорости ионов в нем действие поперечного электрического поля пространственного заряда оказывается существенным. После ускорения ионов действие пространственного заряда снижается и прохождение элементарного пучка через отверстие в ускоряющем электроде уже не сопровождается увеличением диаметра пучка. За четвертым, заземленным электродом пространственный заряд сформированного ионного пучка скомпенсирован электронами вторичной плазмы, образовавшимися в результате ионизации газа, вытекающего из источника или вторичной эмиссии со

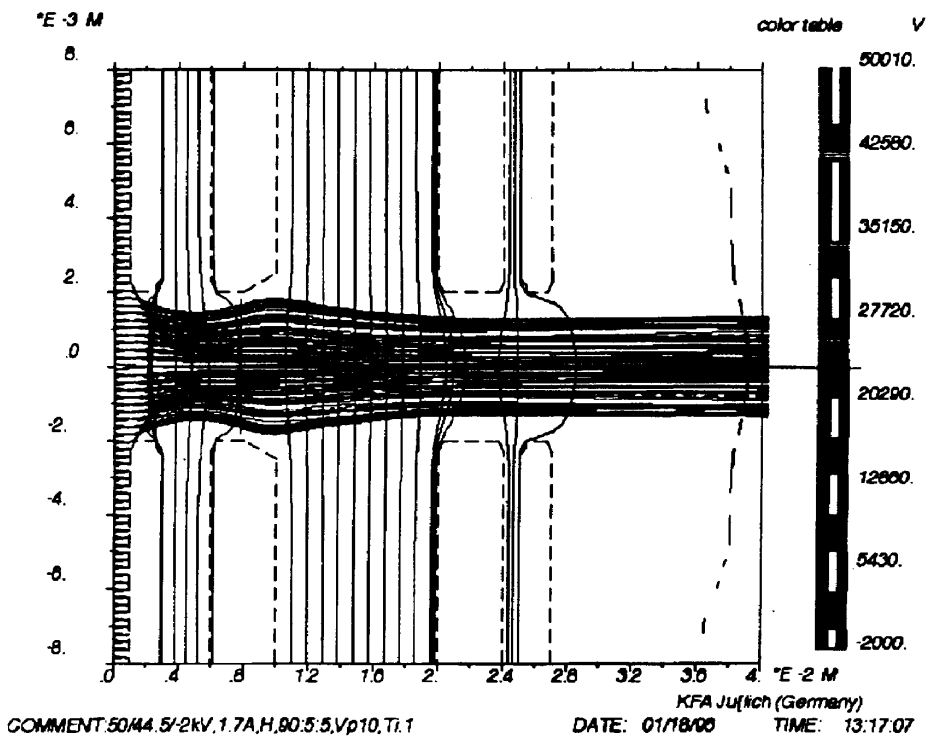


Рис. 1: Траектории ионов в оптимизированном варианте ионно-оптической системы.

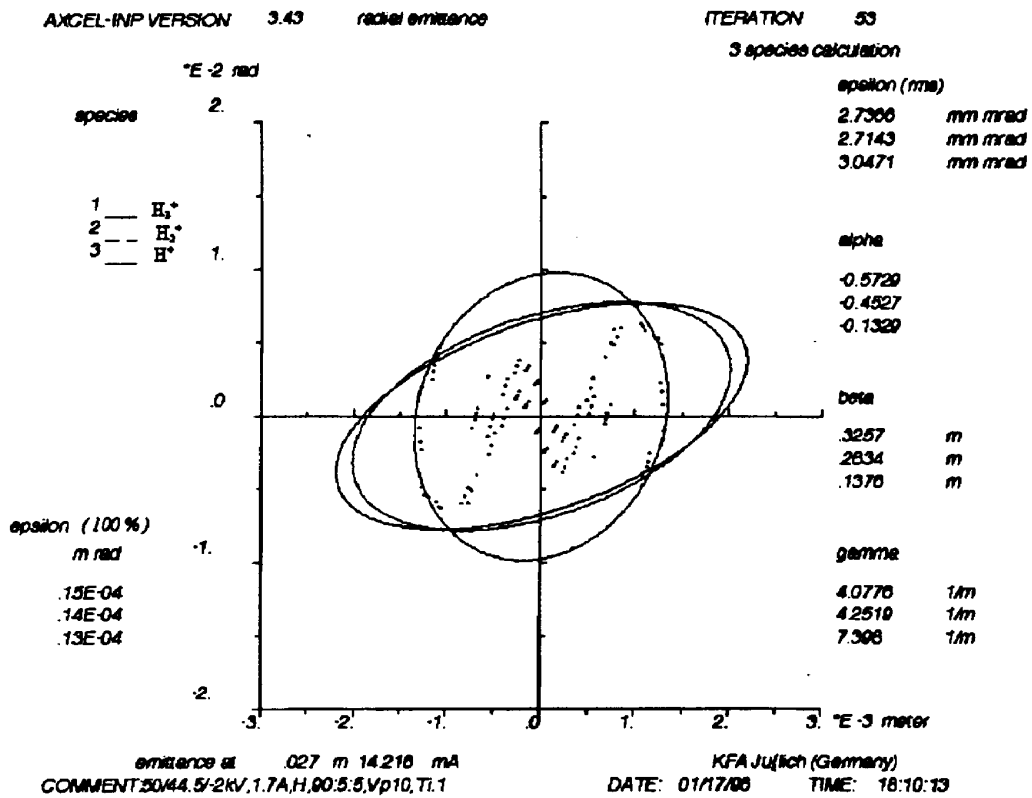


Рис. 2: Диаграммы эмиттанса для оптимизированного варианта ионно-оптической системы.

стенок электродов. Поэтому за четвёртым электродом, во вторичной плазме, ионы пучка двигаются практически с сохранением имеющегося угла. Предполагается, что граница вторичной плазмы совпадает с выходной плоскостью заземленного электрода. В действительности же граница, по-видимому, является искривленной и ее форму, в принципе, можно определить в результате численных расчетов. Однако точная форма границы незначительна вследствие большой энергии выходящих из ячейки ионов пучка.

На рис.2 приведена диаграмма эмиттанса пучка и эллипсы, охватывающие 100% частиц каждой фракции. Из рисунка видно, что все частицы на выходе имеют угловой разброс меньше 0.6° .

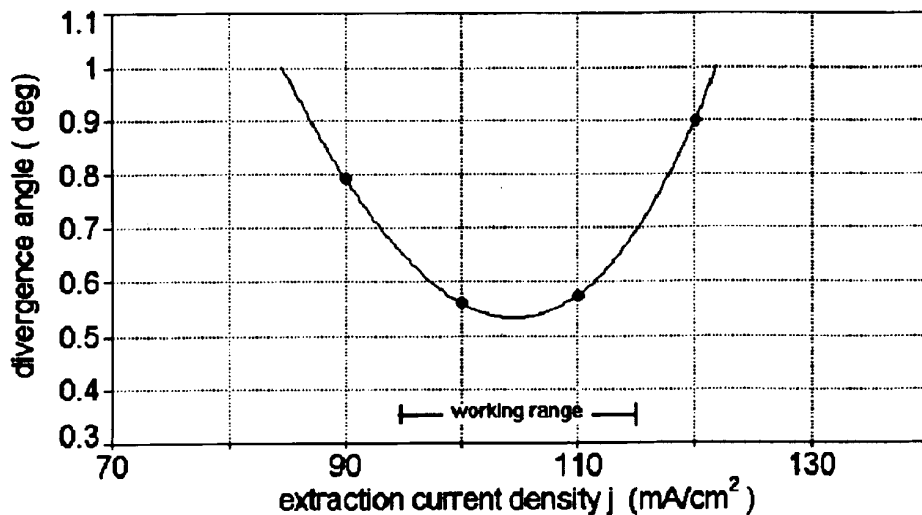


Рис. 3: Зависимость угловой расходимости от эмиссионной плотности тока.

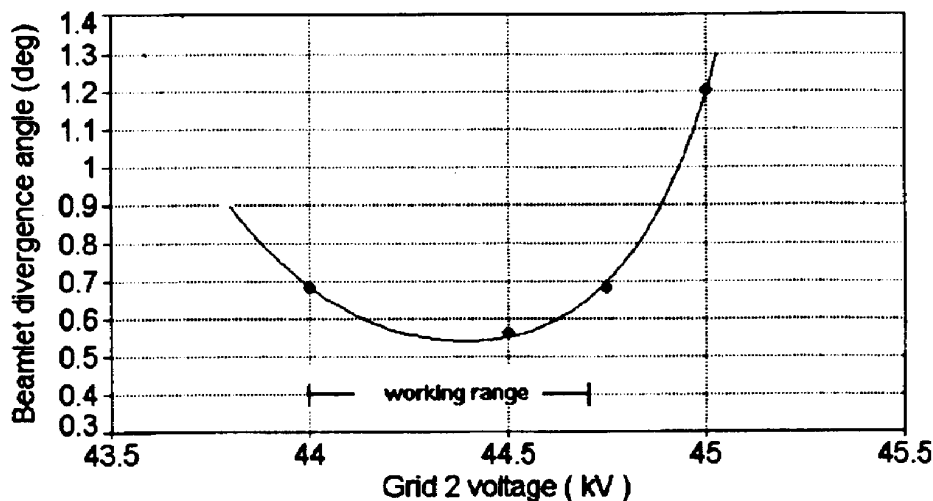


Рис. 4: Зависимость угловой расходимости от напряжения на вытягивающем электроде.

С целью выяснения необходимой точности поддержания рабочих параметров ионно-оптической системы в результате ряда расчетов были получены V -образные зависимости угловой расходимости, определенной из охватывающих все частицы эллипсов, от эмиссионной плотности тока и напряжения на вытягивающем электроде. Если принять допустимую величину угловой расходимости равной 0.65° , то из приведённых на рис.3,4 зависимостей следует, что допустимые изменения эмиссионной плотности тока лежат в интервале $95-112 \text{ mA/cm}^2$, а напряжение на вытягивающем электроде может изменяться от 44.0 до 44.7 kV . Эти интервалы изменений плотности тока и напряжения на вытягивающем электроде представляются вполне приемлемыми.

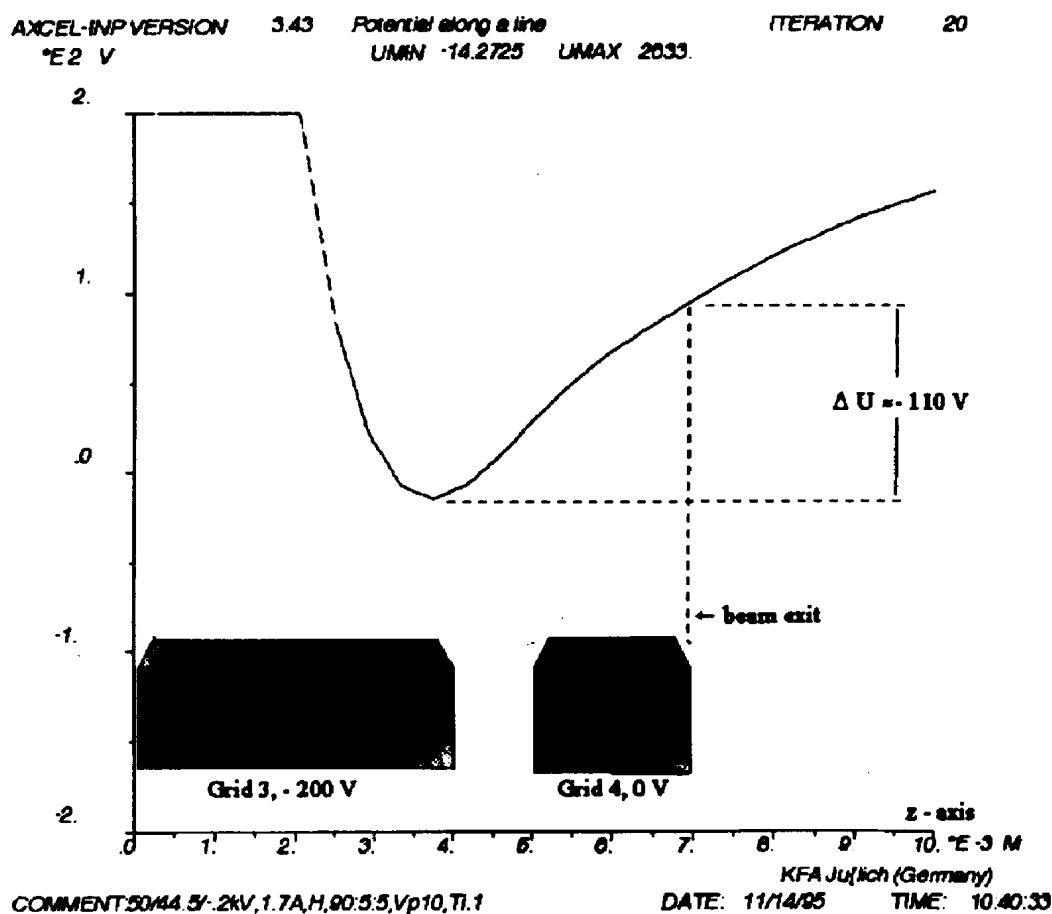


Рис. 5: Профиль потенциала вдоль оси на выходе пучка.

Увеличение толщины ускоряющего электрода даёт также заметный положительный эффект, позволяя снизить величину прикладываемого к нему отрицательного напряжения, необходимого для запираения электронов вторичной плазмы от попадания в ионно-оптическую систему. Расчеты показали, что при снижении величины отрицательного напряжения до 200 V , разность потенциалов на оси между выходом из ионно-оптической системы и минимумом потенциала составляет 110 V , что вполне достаточно для отражения электронов вторичной плазмы. Распределение потенциала вдоль оси на выходе пучка показано на рис.5. Заметим, что значение потенциала

можно уточнить расчет положение границы вторичной плазмы. Однако качественный эффект снижения величины напряжения является несомненным и очень важным для повышения надежности работы ионно-оптической системы.

Определенный интерес представляет изучение возможности увеличения эмиссионной плотности тока за счет уменьшения зазоров между электродами. С этой целью был выполнен расчет варианта, в котором эмиссионная плотность тока была увеличена со 100 mA/cm^2 до 120 mA/cm^2 за счет снижения зазоров между плазменным и вытягивающим электродом с 3 до 2.6 мм, и между вытягивающим и ускоряющим с 10 до 8.8 мм. Результаты расчета траекторий для данного варианта показаны на рис.6. Найденная угловая расходимость пучка на выходе из ионно-оптической системы также не превышает 0.6° .

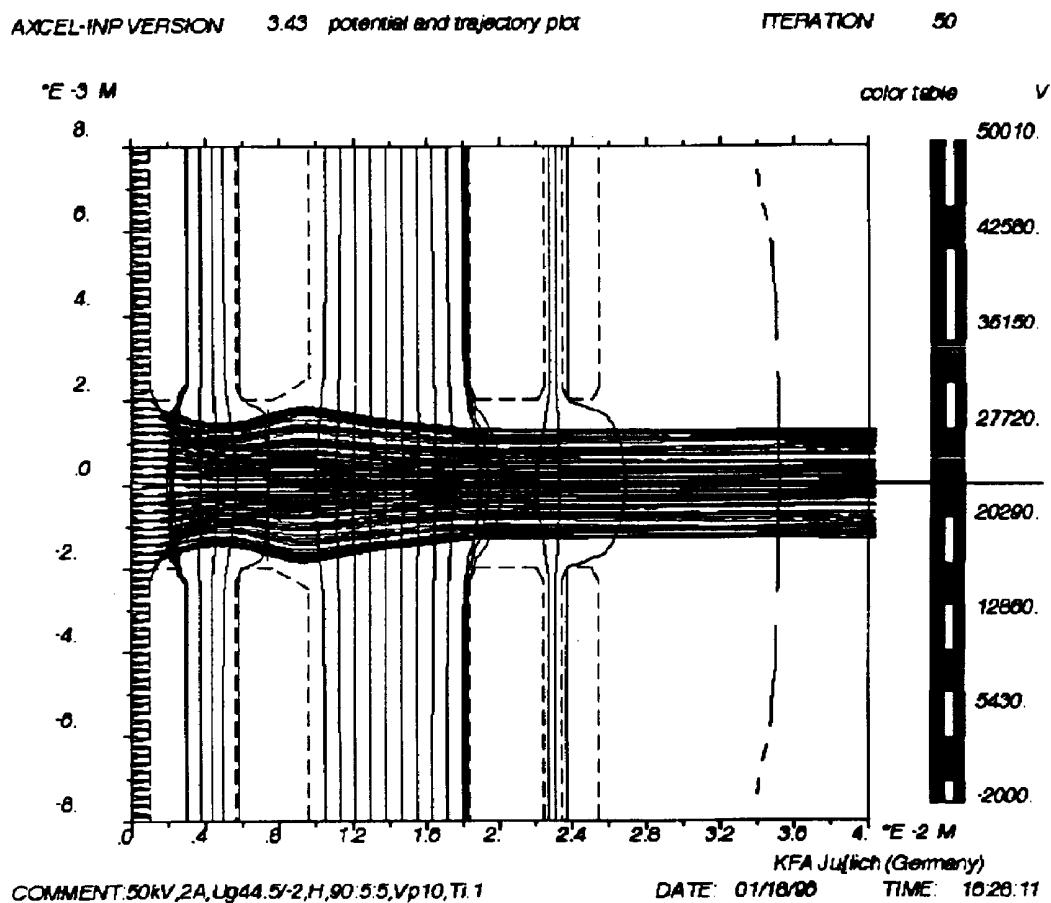


Рис. 6: Траектории ионов в варианте ионно-оптической системы с уменьшенными зазорами.

Как правило, первое включение инжектора и его тренировка проводятся при параметрах значительно ниже рабочих. Поэтому был выполнен проверочный расчет для основного варианта ионно-оптической системы, при котором все напряжения на электродах были снижены вдвое, а эмиссионная плотность тока для сохранения первенса была уменьшена в $2\sqrt{2}$ раза – до 35 mA/cm^2 . В результате этого расчета выяснилось,

что при выбранных параметрах обеспечивается оптимальное формирование пучка и угловая расходимость пучка на выходе составляет 0.8° . Незначительное увеличение углового разброса, по-видимому, связано с влиянием температуры ионов и электронов плазмы эмиттера, которые для обоих вариантов были выбраны одинаковыми.

При формировании пучка в ионно-оптической системе вследствие различного прогрева электродов возникают относительные смещения центров отверстий, что приводит к некоторому угловому отклонению периферийных элементарных пучков. Однако для исследованной ионно-оптической системы с утолщенными вытягивающим и ускоряющим электродами величины угловых отклонений незначительны. Результаты работ [3,4,5] показывают, что для близкой плотности тока, давления газа в зазорах и энергии ионов мощность нагрева электродов вследствие попадания на них вторичных частиц не превышает 0.8% от полной мощности пучка. В этом случае, согласно расчетам, увеличение температуры в центре электрода не превышает $\delta T = 270^\circ\text{C}$, а радиальное смещение отверстий на краю эмиттирующей области диаметром $2R = 7$ см составляет не более 6.0×10^{-3} см.

Отверстия в электродах являются электростатическими линзами с фокусными расстояниями, определяемыми по известной формуле $F = 4U/(E_1 - E_2)$ [8], и при смещении центра отверстия элементарный пучок будет в целом отклоняться. Подстановка значений параметров, взятых из результатов численного моделирования ($U = 50$ кВ, $E_1 = 44.5$ кВ/см, $E_2 = 0$), дает, например, для ускоряющего электрода величину фокусного расстояния $F = 4.4$ см. Тогда предельная величина углового отклонения может быть оценена как $\delta\theta = \delta R/F \approx 0.08^\circ$, что представляется приемлемым.

Выводы

Проведенное численное моделирование показывает, что ионно-оптическая система с вытягивающим и ускоряющим электродами повышенной толщины обеспечивает формирование ионного пучка с угловой расходимостью менее 1° .

Предложенная конструкция ионно-оптической системы не требует применения сложных технологий и допускает значительные отклонения рабочих параметров от оптимальных ($\pm 8\%$ по плотности тока), что упрощает ее изготовление и использование. Кроме того, вследствие большой толщины электродов, напряжение на запорной сетке согласно расчетам может быть уменьшено до ~ 200 В. Уменьшение запорного напряжения должно приводить к снижению нагрузок на электрод.

Полученные при численном моделировании результаты были использованы при разработке конструкции сеточной системы диагностического инжектора. Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую благодарность Б.Швееру (ИРР, KfA Juelich) за поддержку данной работы и стимулирующие дискуссии, а также П.П.Дейчули, которым были выполнены прикидочные расчеты формирования пучка в элементарной ячейке.

Литература

- [1] *E. Hintz and B. Schweer.* Plasma Phys. Control. Fusion **37** (1995), A87-A101.
- [2] *V.I. Davydenko et al.* Proc. 18th Symp. Fusion Techn., Karlsruhe, Germany (1994), p.601.
- [3] *M.M. Menon, C.C. Tsai, J.H. Whealton, D.E. Schechter, G.C. Barber, et al.* Rev. Sci. Instrim. **56** (1985), No. 2, p.242.
- [4] *M.C. Vella, W.S. Cooper, P.A. Pincosy, R.V. Pyle, P.D. Weber, R.P. Wells.* Rev. Sci. Instrm. **59** (1988), No. 11, p.2357.
- [5] *Y. Ohara, M. Akiba, Y. Arakawa, Y. Okumura, and J. Sakuraba.* J. Appl. Phys. **51** (1980), No 7, p.3614.
- [6] AXCEL-Code, P. Spaedtke, Ing. Buero fuer Naturwissenschaft u. Programm-entwicklung, Junkernstr. 99, D - 65205 Wiesbaden, Germany.
- [7] The Physics and Technology of Ion Sources, edited by Ian G. Brown, John Wiley Sons New York (1980), chapt. 3.
- [8] *C.J. Davisson and C.J. Calbrick.* Phys. Rev. **28** (1931), p.525.

*В.И. Давыденко, А.А. Иванов,
А.И. Rogozin, Р. Улеманн*

**Оптимизация ионно-оптической системы
с "толстыми" электродами для диагностического инжектора
атомов токамака TEXTOR**

ИЯФ 96-6

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 19.02.1996 г.

Сдано в набор 21.02.1996 г.

Подписано в печать 21.02.1996 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 6

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротaпpинте ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.