

Электронные и ионные пучки

УДК 537.533.9

Особенности формирования сфокусированного пучка электронов форвакуумным плазменным источником при повышенных давлениях

Е.М. Окс, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, А.А. Гришков, А.А. Зенин, А.С. Климов

На основе трёхмерного компьютерного моделирования с использованием кода КО-BRA3-INP проведен анализ процессов формирования электронного пучка форвакуумным плазменным источником электронов. В результате оптимизации системы формирования и ускорения электронов в области повышенных давлений (20 – 30 Па) источник обеспечил генерацию сфокусированного электронного пучка с током до 200 мА и энергией до 15 кВ.

PACS: 52.59.Tb

Ключевые слова: плазма, извлечение электронов, формирование пучка.

Введение

Генерация электронных пучков так называемыми форвакуумными плазменными электронными источниками [1] в области давлений более 10 Па открывает принципиально новые возможности электронно-лучевой технологии, в частности, обеспечивает эффективную обработку непроводящих керамических материалов [2]. Процессы формирования электронных пучков и их фокусировка при столь высоких давлениях обладают рядом особенностей, которые приходится учитывать при создании соответствующих устройств. В традиционной для плазменных источников электронов области относительно низких давлений (10^{-1} Па и менее) [3] обеспечение необходимой плотности мощности сфокусированного пучка достигается, главным образом, за счет повышения ускоряю-

щего напряжения. При давлениях в единицы и десятки паскалей (т.н. форвакуум) имеет место ограничение ускоряющего напряжения из-за пробоев, и необходимая плотность мощности электронного пучка может быть обеспечена в определенных пределах лишь изменением эмиссионного тока из плазмы и, соответственно, тока пучка.

Как показывает опыт разработки форвакуумных плазменных источников сфокусированных электронных пучков, при токах пучка до 0,05 А электроны могут быть извлечены из плазмы через одиночное отверстие в эмиссионном электроде [4]. Для генерации эмиссионных токов большей величины приходится извлекать электроны с развитой эмиссионной поверхности через несколько или даже множество отверстий в эмиссионном электроде [5], а затем сводить элементарные пучки в узкое пятно. Очевидно, что в этом случае существенно усложняются процессы фокусировки электронного пучка и возрастает его поперечное сечение.

Особенности формирования в форвакуумных плазменных источниках электронов сфокусированных пучков при отборе электронов с распределенной плазменной поверхности через множество элементарных эмиссионных отверстий представляет собой объект исследований, результаты которых изложены в настоящей статье.

Окс Ефим Михайлович, зав. кафедрой, профессор.

Бурачевский Юрий Александрович, доцент.

Бурдовицин Виктор Алексеевич, профессор.

Гришков Антон Андреевич, м.н.с.

Зенин Алексей Александрович, аспирант.

Климов Александр Сергеевич, доцент.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел.: (3822) 414712.

E-mail: oks@fet.tusur.ru burdov@fet.tusur.ru

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2012 г.

© Окс Е.М., Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Гришков А.А., Зенин А.А., Климов А.С., 2013

Экспериментальный макет

Общая схема экспериментального макета плазменного источника электронов выглядит традиционно для электронных источников форвакуумного диапазона давлений (рис. 1, а) [1]. Разряд с полым катодом 1 используется для генерации эмиссионной плазмы 2. Эмиссионное окно в аноде 3 перекрыто перфорированной пластиной 4, которая, по сути, является эмиссионным электродом. Ускорение эмитированных плазмой 2 электронов осуществляется в промежутке анод 3 – ускоряющий электрод 5. Электрическое разделение электродов ускоряющего и разрядного промежутков обеспечивается изоляторами 6 и 7, соответственно. Электронный пучок 8 после фокусировки магнитной линзой 9 принимается на коллектор 10.

Существенное отличие настоящей конструкции системы формирования и ускорения электронного пучка от описанной в [4] состоит в перекрытии эмиссионного окна диаметром 12 мм танталовой пластиной 4 толщиной 1 мм с элементарными отверстиями диаметром 0,6 – 0,8 мм. Общее их количество 120. Это отличие обусловлено необходимостью обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка и сохранения приемлемых уровней тока пучка при повышении давления форвакуумного плазменного источника электронов с 5–10 Па до 20–30 Па. На рис. 1, б и 1, в показаны в увеличенном мас-

штабе ускоряющий промежутки электронного источника с плоской и вогнутой перфорированными пластинами, соответственно.

Наиболее эффективно разбиение эмиссионной поверхности на множество элементарных ячеек может быть осуществлено путем использования мелкоструктурной металлической сетки с высокой геометрической прозрачностью [5]. В то же время в форвакуумной области давлений величина обратного ионного потока из пучковой плазмы на эмиссионный электрод многократно возрастает [6]. Эти ионы, имеющие энергию, соответствующую полному ускоряющему напряжению, оказывают существенное тепловое воздействие на электроды электронного источника. В этих условиях срок службы сеточных электродов резко сокращается. Замена мелкоструктурной сетки на более термостойкую танталовую пластину несколько уменьшает общую площадь элементарных эмиссионных отверстий, а, следовательно, и снижает эффективность извлечения электронов из плазмы. Однако это позволяет значительно увеличить ресурс эмиссионного электрода в условиях интенсивной ионной бомбардировки.

Таким образом, результирующий пучок электронов оказывается состоящим из множества лучей, эмитированных каждым элементарным эмиссионным отверстием. Для обеспечения плотности тока в пучке, доста-

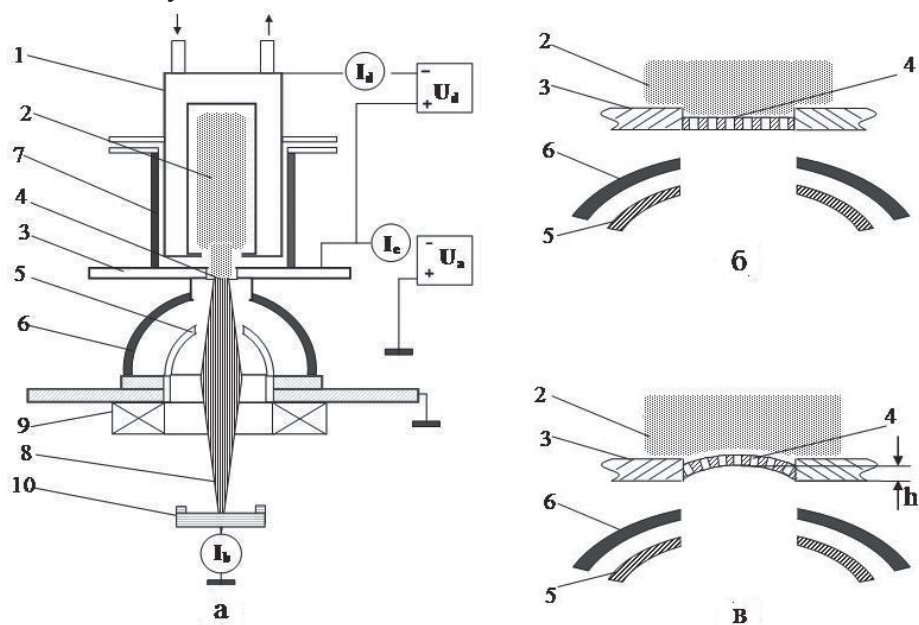


Рис. 1. Схема плазменного электронного источника: 1 — полый катод; 2 — эмиссионная плазма; 3 — анод; 4 — перфорированная пластина; 5 — ускоряющий электрод; 6, 7 — изоляторы; 8 — электронный пучок; 9 — фокусирующая система; 10 — коллектор.

точной для обработки материалов, требуется сфокусировать лучи из множества эмиссионных отверстий в пятно минимального размера в плоскости расположения обрабатываемого объекта. Сам объект, с точки зрения удобства обработки, должен располагаться, по возможности, дальше от электронного источника. В настоящей работе это расстояние было принято равным 14 см.

Результаты расчетов и экспериментов

Анализ траекторий электронных лучей проводился при помощи трёхмерного кода КОBRA3-INP [7–9]. Численная схема кода основана на методе конечных разностей. Решение линейных уравнений для определения электрического поля осуществляется через итерационную процедуру, использующую метод последовательной верхней релаксации (метод Гаусса–Зейделя) [8]. Траектории заряженных частиц моделируются методом трубок тока, а распределение объёмного заряда вычисляется с использованием уравне-

ния Лоренца и закона сохранения заряда. Код КОBRA3-INP достаточно известен и широко используется для моделирования процессов формирования ионных пучков, инжектируемых в ускорители ионов [9]. Поскольку эмиссия ионов и электронов с плазменной границы имеет, в сущности, одну и ту же природу, а также общие закономерности и свойства, то именно эта программа представляется наиболее приемлемой для моделирования плазменных источников электронов. Кроме того, одна из подпрограмм кода КОBRA3-INP позволяет проводить расчет магнитных полей от различных источников с возможностью задания экранирующих элементов.

Для моделирования процесса эмиссии электронного луча из плазмы в программе присутствует самосогласованный алгоритм расчёта установившейся плазменной эмиссионной границы. Предполагается, что вблизи границы плазмы со стороны ускоряющего промежутка плотность ионов уменьшается согласно соотношению Больцмана:

$$n_i = n_{i0} \exp(-\Delta U/kT), \quad (1)$$

где ΔU – разность потенциалов между плазмой и точкой пространства, а далеко за пределами плазмы концентрация положительных ионов равна нулю $n_i = 0$. При этом полагается, что объёмный заряд электронного луча полностью скомпенсирован, и его нейтральность обеспечивается соответствующим соотношением между количеством положительных и отрицательных частиц (отрицательный заряд определяется количеством траекторий и током, который является задаваемым параметром, а положительный заряд определяется через расчёт распределения электрического поля).

В данной работе анализировались траектории элементарных электронных лучей, эмитированных каждым из отверстий в эмиссионном электроде. Компьютерное моделирование проводилось в широком диапазоне параметров, соответствующих условиям эксперимента: напряжение на ускоряющем промежутке 5–15 кВ, потенциал плазмы 2–10 В, общий ток электронного пучка 50–200 мА, ток в фокусирующей катушке 0,12–0,2 А, число витков 6500. Катушка помещалась в

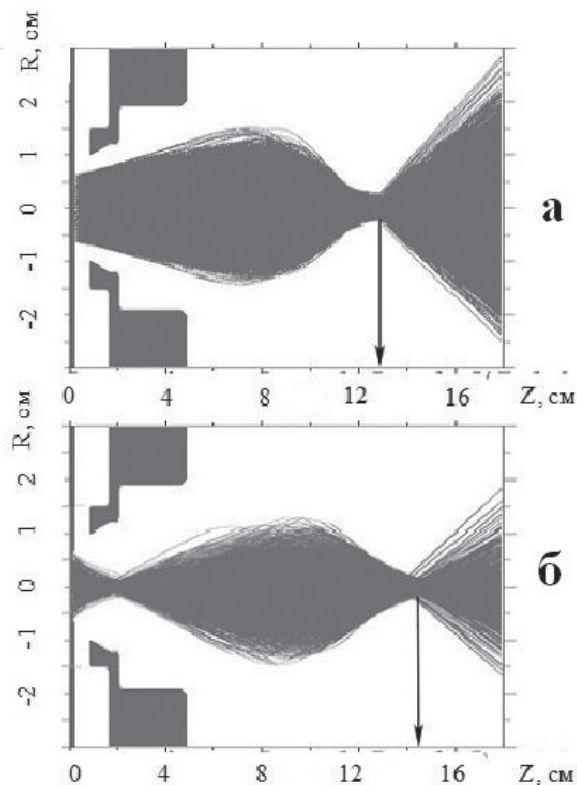


Рис. 2. Типичное распределение электронных траекторий для системы с (а) плоским и (б) вогнутым ($h = 2$ мм) эмиссионным электродом. Z и R – осевая и радиальная координаты, соответственно. Ток электронного пучка в обоих случаях 0,1 А. Магнитное поле на оси катушки ≈ 200 Гс. Стрелками обозначены положения плоскостей с максимумом плотности тока.

магнитный экран, параметры которого соответствовали схеме эксперимента.

Как и ожидалось, характер траекторий элементарных лучей, а также фокусное расстояние и поперечный размер пучка оказались в значительной степени зависящими от формы эмиссионного электрода. На рис. 2, а представлены электронные траектории для плоского эмиссионного электрода в плоскости симметрии вдоль оси системы. Расстояние между эмиссионным и ускоряющим электродами для данных расчётов составляло 7 мм, расстояние от ускоряющего электрода до фокусирующей катушки 12 мм. Потенциал плазмы 10 В, напряжение на промежутке 10 кВ. Ток I_b электронного пучка в расчётах оставался постоянным и был равен 0,1 А. Магнитное поле создавалось катушкой с током 0,2 А, что соответствовало индукции магнитного поля в середине катушки на её оси 200 Гс.

Как можно заметить, в результирующем пучке отсутствует кроссовер. Фокусное расстояние F оказалось равным 13 см, а диаметр пучка d , измеренный по границе области расчетных траекторий, составил 0,7 см в фокальной плоскости. Приведенное значение диаметра характеризует пучок как достаточно грубый инструмент, с помощью которого затруднено проведение операций, связанных с локальным нагревом материала.

Таким образом, как следует из расчетов и экспериментов, для форвакуумных плазменных источников электронов с перфорированным эмиссионным электродом в плоскопараллельной системе формирования электронного пучка не удастся добиться приемлемой фокусировки. Это обусловило поиск решений, обеспечивающих более широкие возможности уменьшения диаметра пучка и увеличения фокусного расстояния. В частности, был выполнен анализ траекторий для эмиссионного электрода вогнутой формы с различным радиусом кривизны (рис.1, в).

Глубина h сферической поверхности в эмиссионном электроде менялась в диапазоне 0,1–3,0 мм, а радиус кривизны в пределах 9–30 мм. При постоянстве размеров эмиссионного электрода обе указанные величины жестко связаны. Как следует из результатов моделирования, глубина h оказывает существенное влияние на характер электронных траекторий.

Результаты моделирования показали, что до глубины 1,15 мм характер траекторий электронного пучка аналогичен картине для плоского эмиссионного электрода. Начиная с глубины 1,5 мм, ситуация изменяется: непосредственно за ускоряющим электродом образуется кроссовер. Это нашло свое отражение как на фокусном расстоянии, так и на минимальном диаметре пучка. Как следует из рис. 2, б, для глубины $h = 2$ мм величины F и d имеют значения 14,5 и 0,4 см. Приведенные расчеты продемонстрировали целесообразность применения вогнутого эмиссионного электрода.

Результаты расчетов нашли подтверждение в эксперименте, проведенном с использованием электронного источника, представленного на рис. 1, а. Измерения фокусного расстояния и диаметра пучка в фокальной плоскости проводились для плоского и вогнутого ($h = 2$ мм) эмиссионного электрода. Для измерения диаметра был применен метод вращающегося зонда [10]. Результаты измерений представлены в таблице.

Заключение

Компьютерное моделирование траекторий электронов кодом КОБРА3-ИПР оказалось эффективным приемом, позволяющим увязать конструктивные параметры источника с характеристиками электронного пучка. Созданная с учетом результатов вычислений конструкция электронного источника с плазменным катодом обеспечила генерацию сфо-

Таблица.

Параметры электронного пучка

Электрод	F , см	E , кВ	I_b , mA	p , Па	d , мм	Газ
Плоский	14,5	10	90	5	10	Воздух
Вогнутый	14,5	10	90	5	5	Воздух
Вогнутый	14,5	15	180	5	5	Воздух

кусированного электронного пучка с током до 200 мА, энергией до 15 кэВ в диапазоне давлений 20 – 30 Па, причем диаметр пучка не превышал 6 мм.

Литература

1. Burdovitsin V.A., Oks E.M. // Laser and particle beams. 2008. V. 26. P. 619.
2. Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. // ФХОМ.. 2010. № 3. С. 39.
3. Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Ремне Н.Г. // ПТЭ. 2009. № 3. С. 104.
4. Бурдовицин В.А., Жирков И.С., Окс Е.М., Осипов И.В., Федоров М.В. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 66.
5. Burdovitsin V.A., Oks E.M. // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. No. 7. P. 2975.
6. Zhirkov I.S., Burdovitsin V.A., Medovnik A.V., Oks E.M. // Изв. Вузов. Физика. 2007. № 9. Приложение. С. 13.
7. KOBRA3-INP <http://spaedtke@INP-DME.com>
8. KOBRA3-INP, INP Wiesbaden, Junkernstr. 99, 65205 Wiesbaden, Germany.
9. Spaedtke P. // Proc. of the LINAC84. Seeheim. Germany. P. 356.
10. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. 2-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1991.

Features of the focused electron beam formation by fore-vacuum plasma source at elevated pressures

E.M. Oks, Yu.A. Burachevsky, V.A. Burdovitsin, A.A. Grishkov, A.A. Zenin, and A.S. Klimov

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: oks@fet.tusur.ru burdov@fet.tusur.ru

On the basis of three-dimensional computer modeling with code use KOBRA3-INP the analysis is carried out of processes of electron beam formation by a fore-vacuum plasma electron source. As a result of optimization of electron beam formation and acceleration system in the range of elevated pressures (20-30 Pa) the source provided generation of the focused electron beam with a current to 200 mA and energy to 15 kV.

PACS: 52.59.Tb

Keywords: plasma, extraction of electrons, electron beam formation.

Bibliography – 10 references

Received November 25, 2012