

Электронные, ионные и лазерные пучки

УДК 537.533

Формирование ленточного электронного пучка форвакуумным плазменным источником электронов

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

Представлены результаты численного анализа и экспериментальных исследований по формированию форвакуумным плазменным источником электронов непрерывного ленточного пучка. Определена оптимальная геометрия электродов ускоряющей системы электронного источника, обеспечившая формирование слабодивергирующего ленточного электронного пучка в отсутствие продольного магнитного поля и специальной фокусирующей системы. Результаты численного моделирования подтверждаются данными эксперимента.

PACS: 52.59.Tb

Ключевые слова: плазменный источник электронов, форвакуумная область давлений, ленточный электронный пучок, транспортировка электронного пучка, электростатическая фокусировка.

Введение

Непрерывные электронные пучки ленточной конфигурации, создаваемые устройствами на основе разрядных систем с плазменным катодом, привлекательны для инициирования реакций окисления и азотирования, а также в плазмохимии органических и неорганических соединений [1].

Расширение рабочего диапазона давлений плазменных источников электронов в так называемую форвакуумную область (1—100 Па) обеспечило возможность непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектриков [2]. При обработке диэлектрических, в частности, керамических материалов, ленточный пучок позволяет проводить обработку большой площади керамики — материала, чувствительного к перепаду температур.

В форвакуумной области давлений, генерируемые плазменными источниками электронные пучки, как правило, имеют энергии уровня 10 кэВ. Такие относительно низкие энергии электронов обуславливают заметное расширение пучка по мере его распространения. Проблема может быть решена использованием в области транспортировки пучка продольного магнитного поля [3]. Однако, транспортирующее магнитное поле не всегда приемлемо, поскольку ограничивает сферу применения пучка. Кроме этого, при повышенных давлениях газа форвакуумного диапазона магнитное поле может стимулировать зажигание разряда в пространстве дрейфа электронного пучка, приводящее к пробое ускоряющего промежутка.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании возможности формирования и транспортировки форвакуумным плазменным источником электронного пучка ленточной конфигурации без использования продольного магнитного поля.

Электронный источник

Форвакуумный плазменный источник ленточного пучка электронов [4] (рис. 1, а) представляет собой трехэлектродную систему, состоящую из протяженного полого катода 1 с внутренними размерами полости 120×60×30 мм, плоского анода 4 с эмиссионным окном 7 размером 100×10 мм, перекрытым мелкоструктурной вольфрамовой сеткой (размер элементарной ячейки 0,4×0,4 мм), и

Климов Александр Сергеевич¹, ст. научный сотрудник.

Бурдовицин Виктор Алексеевич¹, профессор.

Гришков Антон Андреевич², мл. научный сотрудник.

Окс Ефим Михайлович¹, зав. кафедрой, профессор.

Зенин Алексей Александрович¹, инженер.

Юшков Юрий Георгиевич¹, научный сотрудник.

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

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

Тел. 8 (905) 990-52-41. E-mail: klimov@main.tusur.ru

²Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2014 г.

ускоряющего электрода 6. Разряд с полым катодом обеспечивает генерацию эмиссионной плазмы 2. Для ускорения эмитированных плазмой электронов на промежуток анод–ускоряющий электрод подается напряжение U_a 8—10 кВ. Все электроды источника выполнены из нержавеющей стали. Капролоновые изоляторы 3, 5 служат для электрического разделения ускоряющего и разрядного промежутков, а также для крепления и фиксации электродов. Электронный источник установлен на фланце вакуумной установки, откачиваемой с помощью механического форвакуумного насоса *VocEdwards* 80. Необходимое давление (на уровне 5—10 Па) обеспечивалось напуском рабочего газа (воздуха) непосредственно в камеру.

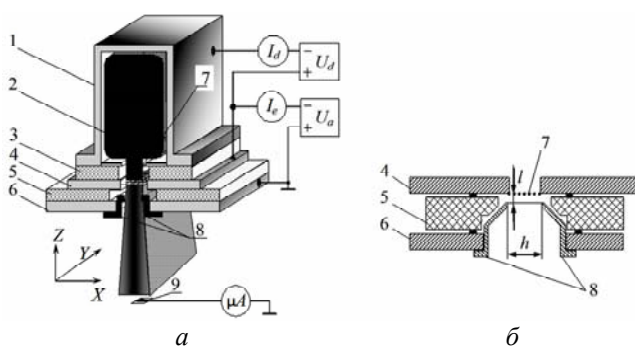


Рис. 1. Схема источника ленточного электронного пучка: 1 — полый катод, 2 — эмиссионная плазма, 3, 5 — изоляторы, 4 — анод, 6 — экстрактор (ускоряющий электрод), 7 — вольфрамовая сетка, 8 — металлические вставки, 9 — перемещаемый коллектор

Численная модель

Анализ электронных траекторий проводился при помощи трёхмерного кода *КОBRA3-IMP* [6]. 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 [7]). Траектории заряженных частиц моделируются методом трубок тока, а распределение объёмного заряда вычисляется с использованием уравнения Лоренца и закона сохранения заряда. Заметим, что код *КОBRA3-IMP* достаточно известен. Он создан и широко используется для моделирования процессов формирования ионных пучков, инжектируемых в ускорители ионов [8].

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.

Для моделирования процесса формирования ускоренных пучков электронов при их эмиссии из плазмы в программе присутствует самосогласо-

ванный алгоритм расчёта установившейся плазменной эмиссионной границы. Предполагается, что вблизи границы плазмы со стороны ускоряющего промежутка концентрация ионов уменьшается согласно соотношению Больцмана:

$$n_i = n_{i0} \exp\left(\frac{-\Delta U}{kT}\right),$$

где n_{i0} — концентрация ионов на границе плазмы, ΔU — разность потенциалов между плазмой и точкой пространства, k — постоянная Больцмана, T — температура ионов.

На большом удалении от электронного пучка концентрация положительных ионов приравнивается к 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).

Результаты расчетов и экспериментов

В отсутствие транспортирующего магнитного поля формирование слабо расходящегося ленточного электронного пучка достигается его электростатической фокусировкой. Такая фокусировка может быть обеспечена оптимизацией геометрии электродов ускоряющего промежутка.

В процессе моделирования варьировался поперечный размер h эмиссионного окна в ускоряющем электроде, а также протяженность l ускоряющего промежутка (рис. 1, б). Угол между плоскими частями вставок и плоскостью анода был максимально близок к углу для пушки Пирса с параллельным потоком [5]. В эксперименте изменение геометрии ускоряющего промежутка осуществлялось размещением в нем металлических вставок 8 (рис. 1, б), электрически соединённых с ускоряющим электродом.

Численное моделирование и экспериментальные исследования по формированию ленточного электронного пучка проводился для следующих внешних параметров: напряжение на ускоряющем промежутке 8 кВ, потенциал на эмиссионной границе плазмы 10 В, ток электронного пучка 100 мА. Поперечный размер h эмиссионного окна в ускоряющем электроде и протяженность l ускоряющего промежутка варьировались в пределах 10—20 и 1—8 мм, соответственно. Результаты моделирования, помимо распределения траекторий в плоскости XOZ (рис. 2), позволяли получать

нормированные распределения плотности тока (рис. 3), из которых на полувысоте определялся поперечный размер электронного пучка d .

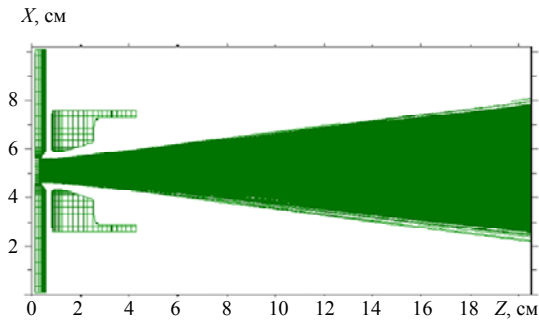


Рис. 2. Распределение траекторий электронов. Параметры геометрии ускоряющего промежутка: $l = 2$ мм, $h = 15$ мм

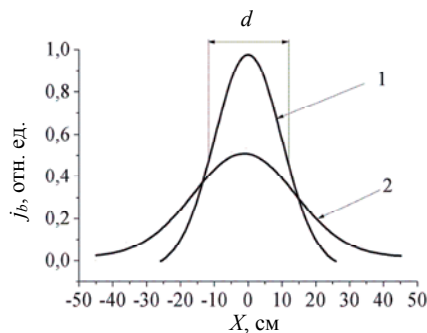


Рис. 3. Распределения плотности тока ленточного пучка, нормированные на максимальное значение, для различных l : 1 — 2 мм, 2 — 8 мм

Как следует из результатов численного моделирования, хотя зависимость поперечного размера электронного пучка d от геометрических размеров ускоряющего промежутка носит немонотонный характер, тем не менее, во всем диапазоне варьируемых параметров l и h не удается получить сходящийся пучок, т. е. кроссовер. Однако получить слаборасходящийся пучок все же возможно. Об этом свидетельствуют представленные на рис. 4 (кривая 2) и рис. 5 расчетные зависимости поперечного размера электронного пучка d от l и h .

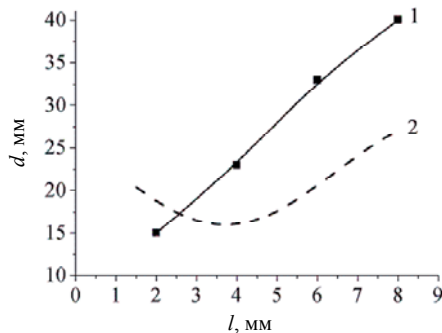


Рис. 4. Зависимость поперечного размера пучка d (на расстоянии 20 см от эмиссионного электрода) от расстояния l при фиксированном размере $h = 15$ мм, 1 — эксперимент, 2 — расчет

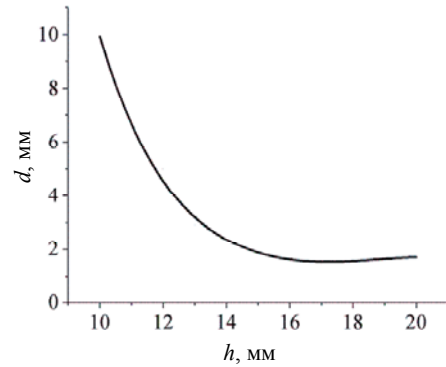


Рис. 5. Зависимость поперечного размера пучка d от расстояния между экстракторными пластинами h при фиксированном расстоянии $l = 2$ мм

На основе полученных зависимостей был определен диапазон параметров геометрии ускоряющего промежутка, в котором наблюдается минимальная толщина электронного пучка. Так, для получения пучка с толщиной около 15 мм необходимо обеспечить расстояние между экстракторными пластинами h в диапазоне 15—17 мм при расстоянии между анодом и экстрактором l в диапазоне 2—4 мм. При необходимости создания более широкого пучка диапазоны изменения l и h также расширяются.

Измерения распределения плотности тока в поперечном сечении электронного пучка производилось с помощью перемещаемого коллектора 9 с коллимирующим отверстием диаметром 3 мм (рис. 1, а). Полученные в эксперименте распределения плотности тока в поперечном направлении сечения ленточного электронного пучка представлены на рис. 6. При поперечном размере эмиссионной щели 1 см минимальное значение измеренного в эксперименте поперечного размера пучка d составило 1,5 см. В эксперименте поперечный размер пучка d увеличивался с ростом расстояния l (кривая 1 рис. 4). В численных же расчетах увеличение d с ростом l происходило лишь начиная с некоторого значения l (кривая 2 рис. 4).

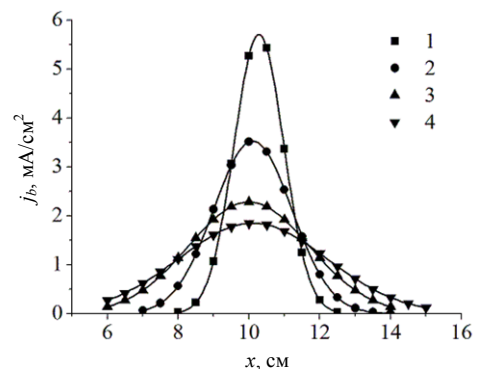


Рис. 6. Распределение плотности тока по поперечному размеру ленточного электронного пучка для различных l : 1 — 5 мм, 2 — 8 мм, 3 — 12 мм, 4 — 15 мм. $h = 16$ мм. Ускоряющее напряжение 8 кВ, ток пучка 100 мА, давление 5 Па

Такое несовпадение в характере зависимости $d(l)$ при малых l , так же как и более высокие значения поперечного размера пучка d при $l > 2,5$ мм в эксперименте по сравнению с полученными при моделировании, может быть связано с неучетом в численной модели процессов упругого рассеяния электронов на атомах остаточного газа. Влияние этих процессов на расширение ускоренного электронного пучка возрастает при переходе в форвакуумную область давлений [9].

Заключение

Представлены результаты исследования особенностей генерации непрерывного ленточного пучка форвакуумным плазменным источником электронов на основе разряда с полым катодом. На основе трёхмерного компьютерного моделирования с использованием кода КОБРА3-INP определена оптимальная геометрия электродов ускоряющей системы электронного источника, обеспечившая формирование слаборасходящегося ленточного электронного пучка и его транспортировку на расстояние в несколько десятков сантиметров от эмиссионного электрода источника в отсутствие продольного магнитного поля и специаль-

ной фокусирующей системы. Результаты численного моделирования подтверждаются данными эксперимента.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-98087.

ЛИТЕРАТУРА

1. Manheimer W. M., Fersner R. F., Lampe M., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. V. 9. P. 370.
2. Бурдовицин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 11. С. 61.
3. Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Федоров М. В. // Изв. ВУЗов. Физика. 2004. № 3. С. 74.
4. Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Бурачевский Ю. А. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 1. С. 104.
5. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Советское радио, 1966.
6. КОБРА3-INP // Proc. LINAC84. Seeheim. Germany. P. 356.7–9; <http://spaedtke@INP-DME.com>, КОБРА3-INP, INP Wiesbaden, Junkernstr. 99, 65205 Wiesbaden, Germany, Spaedtke P.
7. КОБРА3-INP, INP Wiesbaden, Junkernstr. 99, 65205 Wiesbaden, Germany.
8. Spaedtke P. // Proc. LINAC84. Seeheim. Germany. P. 356.
9. Золотухин Д. Б., Климов А. С., Зенин А. А. // Доклады ТУСУР. 2013. Т. 4. № 4. С. 79.

Ribbon electron beam formation by a forevacuum plasma electron source

A. S. Klimov¹, V. A. Burdovitsin¹, A. A. Grishkov², E. M. Oks¹,
A. A. Zenin¹, and Yu. G. Yushkov¹

¹Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
40 Lenin av. Tomsk, 634050, Russia
E-mail: klimov@main.tusur.ru

²Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskyy av., Tomsk, 634055, Russia

Received December 10, 2014

Results of the numerical analysis and experimental research on ribbon electron beam generation based on hollow cathode discharge at forevacuum gas pressure are presented. Geometry of the accelerating gap has modified. It lets to focus the ribbon electron beam and to transport it on a distance of several tens of centimeters in the absence of an axial magnetic field. The results of numerical simulations are confirmed by the experiment.

PACS: 52.59.Tb

Keywords: plasma electron source, forevacuum pressure range, ribbon electron beam, transportation, electron beam, electrostatic focusing.

REFERENCES

1. W. M. Manheimer, R. F. Fersner, M. Lampe, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 370 (2000).
2. V. A. Burdivitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Tech. Phys. Lett.* **35** (11), 61 (2009).
3. V. A. Burdivitsin, E. M. Oks, and M. V. Fedorov, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika*, No. 3, 74 (2004).
4. V. A. Burdivitsin, E. M. Oks, Yu. A. Burachevsky, et al., *Tech. Phys.* **74**, 104 (2004).
5. I. V. Alyamovsky, *Electron Beams and Electron Guns* (Sov. Radio, Moscow, 1966) [in Russian].
6. *KOBRA3-INP*, in *Proc. LINAC84*. (Seeheim. Germany). P. 356.7–9; <http://spaedtke@INP-DME.com>, KOBRA3-INP, INP Wiesbaden, Junkernstr. 99, 65205 Wiesbaden, Germany, Spaedtke P.
7. *KOBRA3-INP*, INP Wiesbaden, Junkernstr. 99, 65205 Wiesbaden, Germany.
8. P. Spaedtke, in *Proc. LINAC84*. (Seeheim. Germany). P. 356.
9. D. B. Zolotukhin, A. S. Klimov, and A. A. Zenin, *Dokl. TUSUR* **4** (4), 79 (2013).