

Электронные, ионные и лазерные пучки

УДК 537.533

Моделирование формирования и транспортировки электронного пучка в газонаполненной электронно-оптической системе с плазменным эмиттером

А. А. Гришков, С. Ю. Корнилов, Н. Г. Ремпе, С. В. Шидловский, В. А. Шкляев

В работе представлены результаты компьютерного моделирования электронно-оптической системы пучки с плазменным эмиттером. Моделирование выполнено с использованием программных кодов КОБРАЗ-ИП, ХООПИС и Ansys. Представленные результаты описывают формирование и транспортировку электронного пучка. Выполнен траекторный анализ. Описаны механизмы влияния газа в области первичного формирования, ускорения и транспортировки пучка на энергетическую неоднородность пучка и его ток. Представлены рекомендации по оптимизации электронно-оптической системы с плазменным эмиттером.

PACS: 02.70.Bf, 02.70.Uu, 41.75.Fr, 41.85.Ct, 52.59.Tb

Ключевые слова: пушка с плазменным эмиттером, электронный пучок, ускоряющий промежуток, ионизация газа, пространственный заряд, нейтрализация заряда.

Введение

В настоящее время изучены и нашли практическое применение пушки с плазменным эмиттером для получения непрерывных и импульсных, узких и широких электронных пучков с различными параметрами, с разной формой поперечного сечения, с заданным распределением плотности тока по сечению. Такое многообразие генерируемых плазменными пушками электронных пучков позволяет применять пушки практически во всех современных электронно-лучевых технологиях, например, таких как сварка, наплавка, модификация материалов и др. [1]. Пушки постоянно совершенствуются, появляются новые сведения об

их особенностях и возможностях практического применения.

Наибольшую сложность для изучения и совершенствования, на наш взгляд, представляют пушки, генерирующие сфокусированные электронные пучки с высокой яркостью. Такие пучки могут использоваться не только в традиционных технологиях, но и в новых, интенсивно развивающихся в последние годы. К ним относятся в первую очередь, аддитивные технологии [2], а также вневакуумные применения, для которых требуется через надежную и недорогую систему вывести пучок в газ повышенного давления.

Сложность изучения таких пушек обусловлена тем, что, кроме исследования плазмы как эмиттера электронов, отдельного внимания требуют процессы формирования пучков. Часто эти исследования выполняются для достижения параметров, уже полученных в пушках с твердотельным термоэмиттером. Например, для формирования пучков с высокой яркостью необходимо изучение электронно-оптической системы (ЭОС) с плазменным эмиттером. Простой перенос уже отработанных в пушках с термокатодом принципов построения такой системы на систему с плазменным эмиттером невозможен.

Цель настоящей работы состоит в изучении особенностей электронно-оптической системы с плазменным эмиттером.

Гришков Антон Андреевич, младший научный сотрудник¹.

Корнилов Сергей Юрьевич, доцент².

Ремпе Николай Гербертович, профессор².

Шидловский Станислав Викторович, профессор³.

Шкляев Валерий Александрович, младший научный сотрудник¹.

¹Институт сильноточной электроники СО РАН. Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

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

Тел. 8 (913) 842-75-25. E-mail: kornilovsy@gmail.com

³Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Статья поступила в редакцию 4 августа 2015 г.

© Гришков А. А., Корнилов С. Ю., Ремпе Н. Г., Шидловский С. В., Шкляев В. Л., 2015

Особенности конструкции

Пушка с плазменным эмиттером представляет собой устройство, содержащее генератор плазмы, систему ускорения (ускоряющий промежуток) и транспортировки пучка, системы фокусировки и отклонения. Одна из особенностей пушек с плазменным эмиттером состоит в необходимости поддерживать в области существования газового разряда давление порядка 10^{-2} — 10^{-1} Торр. Поскольку давление в основной рабочей камере установки часто ниже, нужное для горения разряда давление создается непрерывным напуском газа в разрядную камеру. Напускаемый газ, как правило, откачивается через ускоряющий промежуток. Таким образом, практически всегда ускоряющий промежуток пушки с плазменным эмиттером является газонаполненным. Как влияет напуск газа на параметры электронного пучка, всегда ли газонаполненный ускоряющий промежуток является фактором негативным в сравнении с высоковольтной системой термокатодных пушек? Как распределяется давление газа в ускоряющем промежутке при различных напусках? Однозначные ответы на эти и подобные им вопросы до настоящего времени не даны, несмотря на большой экспериментальный материал, накопленный за время активного изучения пушек с плазменным эмиттером.

Одна из причин неопределенности, возникающей при оценке влияния напускаемого газа, связана с тем, что это влияние анализировалось на основе экспериментального материала, причем в условиях одновременного действия большого количества различных факторов. Вероятно, действи-

тельно новую информацию может дать компьютерное моделирование плазменного эмиттера с газонаполненным ускоряющим промежутком.

Распределение давления в ускоряющем промежутке

В наших экспериментах использовалась пушка с эмиссией электронов из плазмы отражательного разряда с полым катодом. Большинство параметров электронного пучка, генерируемого пушкой этого типа, получены при давлении в вакуумной камере около 10^{-3} — 10^{-4} Торр.

Давление плазмообразующего газа в разрядной камере составляет примерно $5 \cdot 10^{-2}$ Торр. Такое давление создается дозированным напуском газа с интенсивностью объемного потока около 10 — $20 \text{ см}^3 (\text{атм.})/\text{час}$. Разряд горит в непрерывном режиме с напряжением 350 — 450 В и током от $0,1$ до $1,5 \text{ А}$. Указанный диапазон токов разряда позволяет на выходе получать электронный пучок с током от единиц до нескольких сотен миллиампер.

Эмиссия электронов из плазмы происходит через отверстие в катоде разрядной камеры в область ускоряющего поля между этим катодом и заземленным высоковольтным анодом (экстрактором), как это показано на рис. 1. На этом же рисунке представлено распределение давления в ускоряющем промежутке для постоянного давления в вакуумной камере 10^{-3} Торр и при напуске газа в разрядную камеру с расходом около $10 \text{ см}^3 (\text{атм.})/\text{час}$. Распределение давления в области генерации электронного пучка получено путем проведения модельных расчетов в программе Ansys.

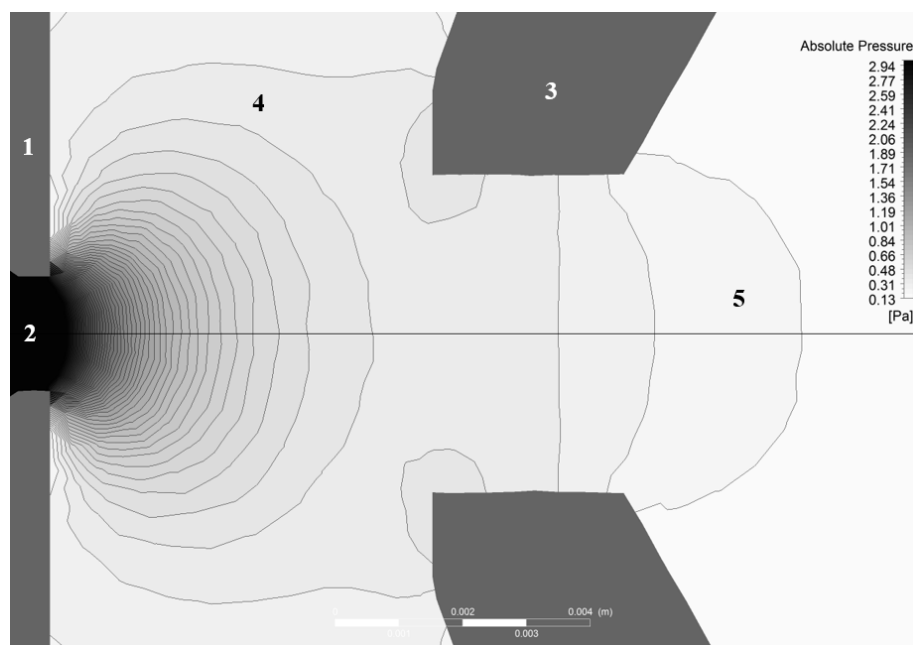


Рис. 1. Картина распределения давления в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером: 1 — эмиттерный катод; 2 — эмиссионный канал; 3 — экстрактор; 4 — ускоряющий промежуток; 5 — пространство дрейфа. Черный цвет — самое высокое давление, белый — самое низкое

Геометрия расчетной области исследуемого объекта задавалась с помощью пакета твердотельного параметрического моделирования SolidWorks. Полученная в SolidWorks геометрическая модель пушки с плазменным эмиттером экспортировалась в САЕ-систему Ansys. С помощью модуля CFX Mesh программы Ansys на расчетную область накладывалась неоднородная сетка конечных элементов. Характерные размеры ячеек сетки варьировались в пределах 10^{-5} — 10^{-2} мм. Неоднородное задание размеров ячеек сетки позволяет регулировать точность и время выполнения модельных расчетов. В условиях задачи количество ячеек сетки составило около 0,5 млн. штук.

Расчет в программе Ansys выполнялся в декартовой системе координат.

Начальными условиями для расчетов были постоянное давление в вакуумной камере, температура газа и скорость потока газа. Граничным условием выступало значение напуска газа через полый катод разрядной камеры.

Указанные условия использовались для численного решения уравнения Навье-Стокса, дополненного уравнениями неразрывности, баланса энергии и состояния [4].

Расчет распределения давления (рис. 2) в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером выполнен для различных сочетаний величин напуска газа в разрядную камеру и давления в вакуумной камере.

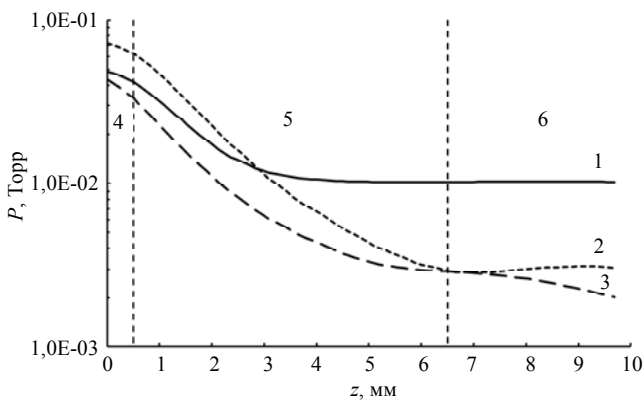


Рис. 2. Распределение давления в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером при заданном давлении P в вакуумной камере (в единицах Торр) и напуске газа в полый катод (в единицах $\text{см}^3(\text{атм.})/\text{час}$) соответственно: кривая 1 — 10^{-2} , 5; 2 — 10^{-3} , 10; 3 — 10^{-4} , 15. Обозначенные области вдоль оси z : 4 — эмитсионный канал; 5 — ускоряющий промежуток; 6 — канал в экстракторе

Эти распределения использовались в дальнейших расчетах по оценке влияния газа в ускоряющем промежутке пушки на формирование пучка. Калибровка расчетов производилась при давлении 10^{-4} Торр без напуска газа в разрядную камеру (вакуумный случай).

Распределения рассчитаны для реальных условий генерации электронного пучка пушкой с плазменным эмиттером. Увеличение давления в ускоряющем промежутке, как следует из экспериментов [5], должно сопровождаться снижением напуска газа в разрядную камеру. Снижение напуска необходимо для обеспечения устойчивой работы пушки с плазменным эмиттером, т. е. без электрических пробоев в ускоряющем промежутке. При давлении в рабочей камере около 10^{-2} Торр напуск газа в разрядную камеру был минимальным. Приведенные распределения наглядно показывают, что в ускоряющем промежутке всегда существует градиент давления в результате постоянного напуска газа в разрядную камеру пушки и его откачки через отверстие в эмитсионном канале. Вблизи эмитсионного канала и в самом канале величина давления может превышать давление в вакуумной камере на 1—2 порядка. Это означает, что формирование электронного пучка в пушке с плазменным эмиттером происходит в условиях, существенно отличающихся от тех, в которых работают термокатодные пушки.

Постановка модельной задачи

Моделирование процессов формирования и транспортировки электронного пучка в электроно-оптической системе с плазменным эмиттером проводилось на вычислительном кластере, состоящем из пяти узлов (Intel Core i5, 8 Gb), четыре из которых дополнительно оборудованы графическим ускорителем (GPU Nvidia Tesla C2050/70), основанном на архитектуре NVIDIA CUDA[®]. Для моделирования применялись два программных кода, а именно, KOBRA3-INP [6], XOOPIC [7].

На рис. 3 представлена расчетная область модельной задачи в программе KOBRA3-INP.

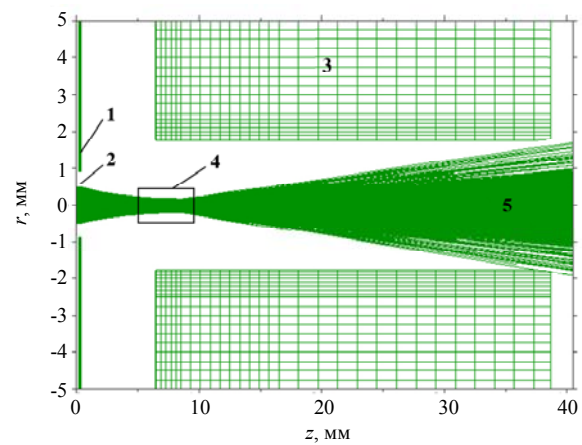


Рис. 3. Траектории электронов в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером. Ускоряющее напряжение 30 кВ. Ток пучка 100 мА. Давление 10^{-4} Торр. 1 — эмиттерный катод; 2 — эмитсионный канал; 3 — экстрактор; 4 — кроссовер электронного пучка; 5 — электронный пучок

На расчетную область накладывалась неоднородная сетка. Размер элементарной ячейки сетки изменялся в направлении распространения электронного пучка от 10^{-5} м вблизи границы плазмы до 10^{-2} м на границе области транспортировки.

Характерные параметры расчетной области (такие как длина ускоряющего промежутка, диаметр и длина эмиссионного канала и отверстия в экстракторе) были аналогичны параметрам пушек с плазменным эмиттером, представленных в [8, 9].

Расчет выполнялся таким образом, чтобы коэффициент токопрохождения электронного пучка был максимальным, как и в реальных условиях работы пушки. Отсутствие утечек контролировалось по разнице тока эмиссии и тока пучка за ускоряющим электродом. Представленные на рисунке траектории получены для типичной геометрии эмиссионной системы и ускоряющего промежутка пушки с плазменным эмиттером. Плазменная граница формируется в глубине эмиссионного канала и имеет вогнутую поверхность по форме эквипотенциала, соответствующей потенциалу плазмы. Такое положение и форма эмиссионной поверхности определяет наличие кроссовера в ускоряющем промежутке.

Расчет в программе KOBRA3-INP — расчет вакуумного случая, который необходим для определения начальных условий (положение плазменной границы, ее форма, начальные энергии частиц, их угловое и энергетическое распределение) в последующем моделировании взаимодействия электронного пучка с газом во временном коде ХООПИС.

Полученные из KOBRA3-INP условия эмиссии накладывались в ХООПИС на аналогичную расчетную область. В нее же «напускался» газ (азот, гелий) с распределением давления, соответствовавшим одной из зависимостей, приведенных на рис. 2. Неупругие взаимодействия электронов и молекул газа (ионизация) моделировались по методу Монте-Карло. Все расчёты проводились на однородной сетке с шагом 10^{-5} м.

Результаты моделирования для газонаполненного диода

На рис. 4 представлены осевые распределения электронов и ионов, рожденных в результате ионизации, а также суммарного пространственного заряда в расчетной области. Расчетная область была «заполнена» азотом с распределением давления, соответствующим зависимости 1 на рис. 2.

Максимум на распределении электронов (зависимость 1) соответствует положению кроссовера электронного пучка (рис. 3). В кроссовере максимальна плотность электронного тока. Из рас-

четов следует, что здесь также максимальна и концентрация ионов (зависимость 2), которая оказывается сравнимой с электронной. Равенство концентраций электронов и ионов в области кроссовера приводит к нейтрализации объемного заряда пучка (зависимость 3).

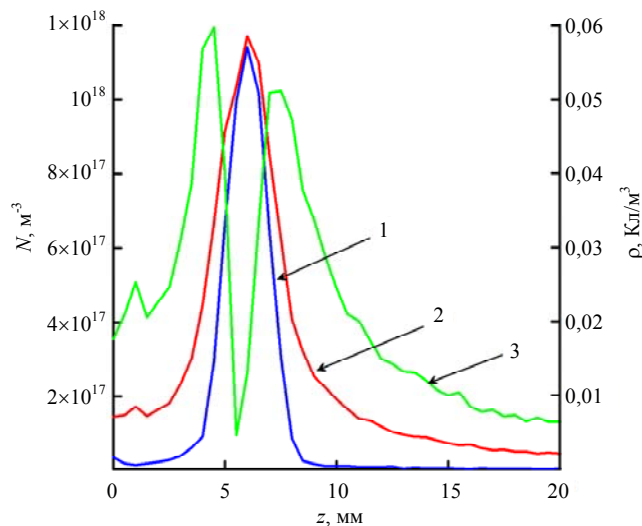


Рис. 4. Распределение электронов (1), ионов (2) и объемного заряда (3) на оси ускоряющего промежутка

В остальной части расчетной области (слева и справа от кроссовера), как показывают расчеты, суммарный заряд положительный. Следовательно, объемный заряд электронного пучка здесь перекомпенсирован. Наиболее простое объяснение существует для эффекта перекомпенсации в области, правее кроссовера. В этой области имеются условия для накопления ионов. Эти условия выражаются в том, что ионы имеют малую подвижность, поскольку находятся в эквипотенциальном пространстве.

Из представленных распределений видно, что ионизация газа происходит на всем протяжении ускоряющего промежутка. Большинство ионов уходят по полю в область плазменной границы. Ионный ток в плазму при этом не превышает 1 % от тока электронного пучка для всех распределений давления в ускоряющем промежутке и максимален для условий, соответствующих распределению давления по зависимости 2 (рис. 2). Отметим, что существуют ионы, которые попадают на катод. Относительная доля таких ионов невелика и составляет до 0,1 % от тока электронного пучка.

Как известно [10, 11], вероятность ионизации снижается с ростом энергии электронов (после некоторого уровня). Это означает, что основной вклад в ионизацию газа и формирование ионного тока дают электроны с низкой энергией, соответствующей максимуму функции ионизации.

Такие условия создаются для эмитированных из плазмы электронов вблизи эмиссионной поверхности. Об этом свидетельствует и вид энергетического распределения ионов (рис. 5), рожденных в ускоряющем промежутке.

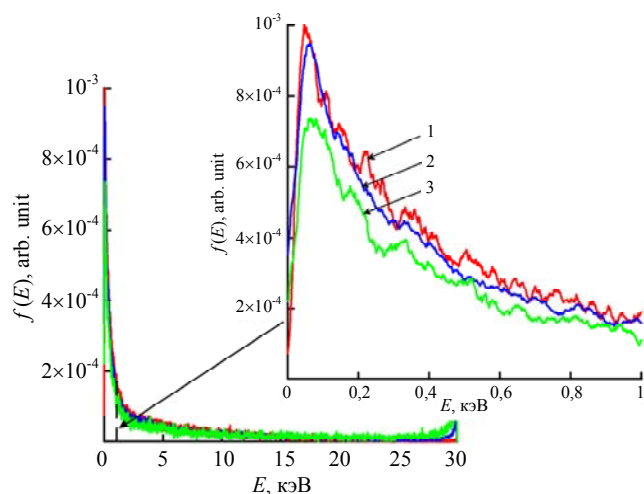


Рис. 5. Распределение рожденных в ускоряющем промежутке ионов по энергиям при давлении в вакуумной камере (в единицах Торр): 1 — 10^{-2} , 5; 2 — 10^{-3} , 10; 3 — 10^{-4} и напуске газа в полый катод $15 \text{ см}^3(\text{атм.})/\text{час}$

Распределения ионов по энергиям, рассчитаны для давлений в ускоряющем промежутке, представленных на рис. 2. Максимум на распределениях соответствует энергии порядка 80 эВ. Эту энергию эмитированные из плазмы электроны приобретают на небольшом (десятые доли миллиметра) расстоянии от эмитирующей поверхности. Кроме того, вблизи эмиссионной поверхности максимальна концентрация нейтральных частиц газа, что способствует более интенсивному протеканию ионизационных процессов в этой области.

Заключение

В работе [12] показано, что в пушках с плазменным эмиттером, несмотря на относительно большую температуру извлекаемых из плазмы электронов, достигаются параметры сфокусированных электронных пучков, близкие к параметрам пучков в термокатодных пушках. Так, яркость пучков, оцененная на большом (около 0,5 м) расстоянии от фокусирующей системы пушки с плазменным эмиттером, оказалась близкой по значениям к яркости пучков термокатодных пушек. Такие результаты были достигнуты в экспериментах путем подбора формы, размеров электродов, материалов, из которых изготовлена ЭОС с плазменным эмиттером и не всегда находили теоретического объяснения.

Приведенные в настоящей работе данные могут дать некоторые дополнительные аргументы

в пользу того, что ЭОС пушек с плазменным эмиттером имеют ряд особенностей, позволяющих компенсировать недостаток плазменного эмиттера — высокую температуру электронов — и получать сверхтонкие пучки. Один из таких аргументов — это особенность ЭОС, состоящая в неустрашимом присутствии газа в промежутке ускорения.

Расчеты показали, что присутствие газа в ускоряющем промежутке пушки с плазменным эмиттером приводит к образованию положительного ионного объемного заряда при прохождении пучка электронов. Этот заряд способен не только электрически нейтрализовать пучок, но и в отдельных случаях привести к перекомпенсации его электронного заряда. Компенсация объемного заряда в пространстве формирования и ускорения пучка — это принципиальное отличие электронно-оптической системы с плазменным эмиттером от термокатодной системы. Компенсация может существенно влиять на ход электронных траекторий пучка, а перекомпенсация может способствовать дополнительной ионной фокусировке пучка [11]. Перекомпенсация пучка в термокатодной пушке также возможна, однако лишь в пространстве дрейфа, в результате прохождения пучка электронов в среде остаточных газов и паров металлов из нагретого или расплавленного металла. Таким образом, можно утверждать, что наличие более высокого давления в ускоряющем промежутке пушки не является негативным фактором для формирования электронного пучка, а в большинстве случаев способствует достижению его высокого качества.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Соглашение № 14.577.21.0018 (RFMEFI57714X0018).

ЛИТЕРАТУРА

1. Окс Е. М. Источники электронов с плазменным катодом. — Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
2. Murr L. E. // Additive Manufacturing. 2015. V. 5. P. 40.
3. Корнилов С. Ю., Ремпе Н. Г. / 4-й Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника»: Труды. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 2012. С. 14.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Дрофа, 2003.
5. Белюк С. И., Крейнделев Ю. Е., Ремпе Н. Г. // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 1. С. 203.
6. Spaedtke P. // Proc. LINAC84. Seeheim. Germany. 1984. P. 356.
7. Verboncoeur J. P., Langdon A. B., Gladd N. T. // Computer Physics Communications. 1995. V. 87. P. 199.
8. Корнилов С. Ю., Ремпе Н. Г. // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 3. С. 79.

9. Hassel T., Rempe N., Kornilov S. et al. // *Welding and Cutting*. 2012. V. 11. No. 2. P. 122.
 10. Абрамян Е. А., Альтеркоп Б. А., Кулешов Г. Д. Интенсивные электронные пучки. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

11. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
 12. Корнилов С. Ю., Ремпе Н. Г., Бенишаш А. И др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 19. С. 1.

Simulation of the formation and transportation of an electron beam in a gas-filled electron-optical system with a plasma emitter

A. A. Grishkov¹, S. Yu. Kornilov², N. G. Rempe², S. V. Shidlovskiy³, and V. A. Shklyayev¹

¹Institute of High Current Electronics, SB RAS
 2/3 Akademicheskoy av., Tomsk, 634055, Russia

²Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
 40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
 E-mail: kornilovsy@gmail.com

³Tomsk State University
 36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

Received August 4, 2015

The report presents the results of the computer simulation of an electron-optical system with a plasma emitter. Simulations have been performed using KOBRA3-INP, XOOPIC, and Ansys. The given results describe the formation and transportation of an electron beam. The trajectory analysis has been executed. The mechanisms of the gas influence on the beam energy inhomogeneity and current, which are at the regions of primary formation, accelerating and transporting are described. Recommendations for optimizing an electron-optical system with a plasma emitter for its using in non-vacuum electron beam apparatus are performed.

PACS: 02.70.Bf, 02.70.Uu, 41.75.Fr, 41.85.Ct, 52.59.Tb

Keywords: gun with a plasma emitter, electron beam, accelerating gap, ionization, space charge, charge neutralization.

REFERENCES

1. E. M. Oks, *The Sources of Electrons with a Plasma Cathode* (Izd. NTL, Tomsk, 2005) [in Russian].
2. L. E. Murr, *Additive Manufacturing* **5**, 40 (2015).
3. S. Yu. Kornilov and N. G. Rempe, in *Proc. 4-th Intern. Kreindel. Seminar "Plasmic Emissive Electronics"* (Ullan-Ude, BNTs SO RAN, 2012). P. 14.
4. L. G. Loitsyanskii, *Mechanics of Liquid and Gas* (Drofa, Moscow, 2003) [in Russian].
5. S. I. Belyuk, Yu. E. Kreindel, and N. G. Rempe, *Tech. Phys.* **50** № (1), 203 (1980).
6. P. Spaedtke, in *Proc. LINAC84* (Seeheim, Germany, 1984). P. 356.
7. J. P. Verboncoeur, A. B. Langdon, and N. T. Gladd, *Computer Physics Communications* **87**, 199 (1995).
8. S. Yu. Kornilov and N. G. Rempe, *Tech. Phys.* **82** (3), 79 (2012).
9. T. Hassel, N. Rempe, S. Kornilov, et al., *Welding and Cutting* **11** (2), 122 (2012).
10. E. A. Abramyan, B. A. Altterkop, and G. D. Kuleshov, *Intensive Electron Beams* (Energoatomizdat, Moscow, 1983) [in Russian].
11. S. I. Molokovskii and A. D. Sushkov, *Intensive Electron and Ion Beams* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
12. S. Yu. Kornilov, N. G. Rempe, A. Beniyash, et al., *Tech. Phys. Lett.* **39** (19), 1 (2013).