

К РАСЧЕТУ ВЕЛИЧИНЫ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ В ИСТОЧНИКЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Сковородко М.А.,

аспирант, ВГУ имени П.М. Машерова,
г. Витебск, Республика Беларусь

Научный руководитель – Антонович Д.А., канд. техн. наук, доцент

Ключевые слова. Источник заряженных частиц, низкоэнергетические электронные пучки, токопрохождение, ток пучка, экспандер.

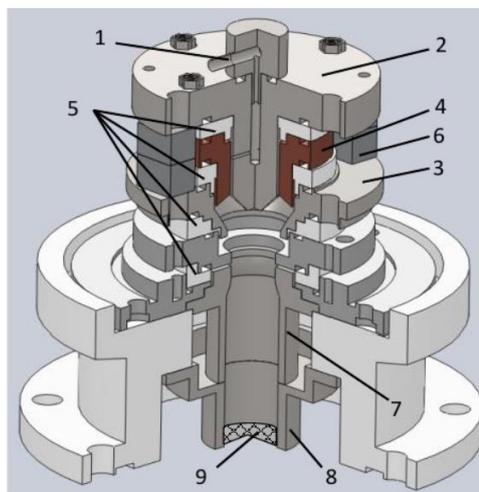
Keywords. Source of charged particles, low-energy electron beams, current flow, beam current, expander.

В связи с расширением области применения плазмохимических технологий, интерес к получению низкоэнергетических пучков заряженных частиц с энергией до 5 кэВ достаточно высок. Подобные технологии, как правило, сопровождаются достаточно интенсивным газоотделением и предполагают воздействие на поверхности достаточно большой площади с высокой степенью однородности энерговклада в изделие [1–3]. Поэтому реализация подобных технологий с помощью низкоэнергетических плазменных источников представляется наиболее эффективной, а в ряде случаев единственно возможной [4]. Ранее проведенные исследования [5] показали возможность создания новых конструкций источников с плазменным эмиттером для получения низкоэнергетических электронных пучков способных формировать пучки заряженных частиц для модификации свойств поверхностей, в том числе и при достаточно низких (до 5 кВ) ускоряющих напряжениях. Однако, конструктивные особенности и особенности формирования пучков при таких ускоряющих напряжениях изучены недостаточно. В данной работе предложен оценочный расчет эффективности токопрохождения в электроде расширителя (экспандере) конструкции, описанной в [6], структура которой представлена на рисунке 1.

Материалы и методы. Методологическую базу данной статьи составляет литература научно-исследовательских трудов.

Результаты и их обсуждение. В рассматриваемой конструкции после прохождения ускоряющего промежутка пучок электронов движется в заземленном электродо-расширителе (экспандере) 8 в котором создано продольное магнитное поле и, проходя через сеточный электрод 9 с тем же потенциалом, выходит в рабочую вакуумную камеру, где попадает на обрабатываемое изделие. Процесс транспортировки пучка в экспандере сопровождается рядом процессов, влияющих на величину токопрохождения и снижающих его. Рассмотрим упрощенную модель прохождения пучка электронов в экстракторе без учета влияния данных процессов и определим теоретически максимально возможный ток пучка при прохождении его в экспандере.

В качестве упрощенной модели рассмотрим движение электронного пучка вдоль оси заземленного металлического цилиндра радиусом R , в конце проходящего через заземленную сетку, и определим максимальное значение тока пучка I_{max} для данной системы (за сечение пучка примем окружность радиусом $r \ll R$), оно и будет соответствовать



1 – штуцер для напуска плазмообразующего газа; 2, 3 – катоды; 4 – анод; 5 – изоляторы; 6 – постоянные магниты; 7 – ускоряющий электрод; 8 – расширитель плазмы (экспандер); 9 – сеточный электрод

Рисунок 1 – Разрядная структура для формирования низкоэнергетических пучков заряженных частиц [6]

теоретическому максимально возможному току пучка в такой конструкции после извлечения электронов из области формирования плазмы газового разряда.

Электронный пучок, выходя из экспандера, пересекает поверхность (сеточный электрод), у которой потенциал совпадает с потенциалом стенок оболочки. Если разность потенциалов пучка и стенок велика, то часть электронов отразится назад. Т. е., существует такой предельный ток, при котором рассматриваемая система будет работать эффективно.

Ток электронов в пучке связан с напряженностью поля, создаваемого электронами. Согласно теореме Гаусса напряженность поля на расстоянии R от центра пучка в такой системе равна:

$$E = \frac{4\pi n}{2\pi R} = \frac{2I}{Rev'}$$

где I – ток электронов в пучке, n – число электронов на единицу длины пучка, v – скорость электронов в пучке, e – заряд электрона. Используя связь напряженности и потенциала электрического поля [7]:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr'}$$

найдем разность потенциалов между пучком и стенками оболочки

$$\varphi = \frac{2I}{ev} \ln \frac{R}{r}. \quad (1)$$

При прохождении электронами заземленной сетки, они теряют энергию соответствующую значению $e\varphi$. Учитывая, что энергия электронов на входе в экстрактор $e\varphi_0$ (φ_0 – потенциал, в котором ускорялись электроны при выходе из источника заряженных частиц), выразим скорость электронов на выходе системы (m – масса электрона)

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}(\varphi_0 - \varphi)}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), выразим величину тока

$$I = \frac{ev\varphi}{2\ln(R/r)} = \frac{e\sqrt{(2em)(\varphi_0 - \varphi)}\varphi}{2\ln(R/r)}.$$

Очевидно, что максимальное значение тока пучка

$$I_{max} = \frac{e}{3} \left(\frac{2e}{3m}\right)^{1/2} \frac{\varphi_0^{3/2}}{\ln(R/r)}$$

соответствует потенциалу пучка относительно стенок в области сетки с $\varphi_{max} = \frac{2}{3}\varphi_0$ [8].

Анализируя, полученное выражение, видно, что потенциал электронного пучка относительно стенок увеличивается при увеличении тока, проходящего в данной системе. Повышая ток электронов до некоторого предела, наступает ситуация, когда запирающий потенциал возвращает часть электронов назад и тем самым ограничивает ток электронов, прошедших через систему ($I > I_{max}$). При этом образуется неустойчивость, в результате которой запирающий потенциал возрастает скачком от $\frac{2}{3}\varphi_0$ до φ_0 .

Заключение. Рассмотренный расчет может быть использован при разработке программного комплекса для моделирования плазменных процессов в электронно-оптических системах.

1. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю.Е. Крейндель [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
2. Завьялов М. А. [и др.] Плазменные процессы в технологических электронных пушках – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.
3. Шиллер, З. Электронно-лучевые технологии / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
4. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск : НТЛ, 2005. – 216 с.
5. Антонович, Д.А. Электронно-ионный источник для реализации комбинированного воздействия на поверхность / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
6. Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно-оптические системы плазменных источников электронов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В. Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 с.
7. Ландау, Л.Д. Краткий курс теоретической физики. Книга 1. Механика. Электродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1969. – 271с.
8. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа: В задачах с решениями. —3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 424 с.