#### УДК 537.533.9

# ТРАНСФОРМАЦИЯ В КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, КОМПЕНСИРОВАННОГО ПО ЗАРЯДУ

Т.В. Коваль, Х.З. Ле

Томский политехнический университет E-mail: tvkoval@mail.ru

Теоретически исследован процесс трансформации поперечного сечения слаборелятивистского электронного пучка, компенсированного по заряду в канале транспортировки. Показано, что трансформация электронного пучка круглого сечения в пучок прямоугольного может происходить при формировании специальной конфигурации магнитных полей: продольного ведущего и создаваемого обратным токопроводом.

#### Ключевые слова:

Электронный пучок, плазма, канал транспортировки, трансформация, магнитное поле.

## Key words:

Electron beam, plasma, transport channel, transformation, magnetic field.

# Введение

Низкоэнергетические (10...30 кэВ) сильноточные (до 25 кА) электронные пучки применяют для поверхностной обработки поверхности материалов. В импульсном электронном источнике со взрывоэмисионным катодом [1, 2] получены сильноточные микросекундные (до 5 мкс) электронные пучки с плотностью энергии до 20 Дж/см<sup>2</sup>. Одна из задач при применении импульсных электронных источников – это управление параметрами пучка, его формой и распределением плотности энергии в поперечном сечении.

В сильноточном электронном пучке собственное магнитное поле превышает 1 кГс, поэтому его транспортировка возможна лишь в определенной области значений ведущего магнитного поля [3-5]. Движение электронов имеет колебательный характер, определяемый собственным и внешним магнитными полями. Транспортировку электронного пучка в протяженных каналах транспортировки с малыми потерями тока и без изменения формы пучка можно осуществлять в аксиально-симметричном ведущем магнитном поле. Преобразование формы пучка круглого сечения во избежание потерь тока пучка целесообразно осуществлять в конце канала транспортировки в аксиально-неоднородном ведущем магнитном поле. В сильноточных электронных источниках неоднородное магнитное поле специальной конфигурации может быть сформировано обратным токопроводом, сконструированным в виде прямоугольных пластин или ряда шпилек, прикрепленных к мишени (рис. 1).

В работе проводится теоретическое исследование трансформации компенсированного по заряду электронного пучка круглого сечения в пучок прямоугольного сечения. Внешнее магнитное поле, создается соленоидами и обратным токопроводом, выполненным в виде 2-х прямоугольных пластин и 4-х шпилек.



**Рис. 1.** Схема канала транспортировки: 1) электронный пучок; 2) обратный токопровод; 3) мишень; 4) инжектор; 5) соленоиды

#### Математическая модель

Считаем, что транспортировка электронного пучка в канале транспортировки происходит в условиях зарядовой и токовой нейтрализации. В этом случае динамику, распределение скоростей и параметры пучка на выходе из трубы дрейфа определяют следующие магнитные поля: аксиальное поле соленоидов; поле токопровода (пластинок или шпилек) и собственное поле пучка, связанное с его полным током  $I_b$ . Движение слаборелятивистских электронов и формирование огибающей электронного пучка с учетом изменения его радиуса и плотности тока описывается системой уравнений [5]:

$$d\mathbf{p}/dt = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \tag{1}$$

Здесь p и **v** – импульс и скорость электрона; B – суммарное магнитное поле; e – заряд электрона. Система уравнений (1) допускает аналитические оценки в предположении, что скорости электронов

и плотность зарядов не имеют пространственного распределения. В общем случае система уравнений (1) решается численно.

Собственное магнитное поле пучка круглого сечения определяется выражением

$$B_{c} = \frac{2I_{b}}{r_{b}c} \begin{cases} 1, & 0 \le r \le r_{b}, \\ (r_{b} / r)^{2}, & r_{b} \le r \le R, \end{cases}$$
(2)

где  $r_b$  — радиальная координата огибающей пучка; R — радиус трубы дрейфа; c — скорость света. Формула (2) может применяться при слабой деформации пучка с учетом изменения  $r_b$ .

Запишем компоненты магнитного поля токопровода, используя выражение магнитной индукции  $dB=I[dl,r]/r^3c$ , создаваемой элементом тока *Idl* в точке ( $x_4$ ,  $y_4$ ,  $z_4$ ) на расстоянии r от него.

Магнитное поле пластинки. Пусть тонкая пластинка размером  $S=D \times L$  расположена в плоскости *YOX* (координата зафиксирована), по которой вдоль координата *z* течет ток *I*. В этом случае  $[dl,r]=dz(y-y_A)i+dz(x_A-x_0)j$  и индукция магнитного поля имеет две компоненты:

$$Bx = \frac{I}{cS} \iint_{S} \frac{(y - y_{A})dydz}{r^{3}}, \ B_{y} = \frac{I}{cS}(x_{A} - x_{0}) \iint_{S} \frac{dydz}{r^{3}}.$$
(3)

Интегралы (3) вычисляются численно при решении системы (1).

Магнитное поле шпильки. Пусть шпилька длиной *L* расположена вдоль оси *Oz* (координаты  $x_0$  и  $y_0$ зафиксированы), по которой течет ток *I*. Считаем, что радиус шпильки очень мал по сравнению с *L* и *r*. В этом случае  $[dl,r]=dz(y_0-y_A)i+dz(x_A-x_0)j$  и магнитная индукция шпильки определяется двумя компонентами:

$$B_{x} = \frac{I}{c} (y_{0} - y_{A}) \int_{L} \frac{dz}{r^{3}}, \quad B_{y} = \frac{I}{c} (x_{A} - x_{0}) \int_{L} \frac{dz}{r^{3}}, \quad (4)$$

где 
$$\int_{L} \frac{dz}{r^{3}} = \frac{z - z_{A}}{\left[ \left[ (x_{A} - x_{0})^{2} + (y_{A} - y_{0})^{2} \right] \times \left[ x \left[ (x_{A} - x_{0})^{2} + (y_{A} - y_{0})^{2} + (z_{A} - z)^{2} \right]^{1/2} \right]} \right]}.$$

Выражения (2)–(4) для расчета магнитных полей используются при решении системы уравнений (1); результаты расчетов находятся в хорошем согласии с данными, полученными с помощью пакета COMSOL Multiphysics.

Ведущее магнитное поле двух соленоидов вычислялось с применением пакета COMSOL Multiphysics. Аналитически поле на оси катушки описывается формулой:



Рис. 2. Распределение компонент магнитного поля токопровода в сечении z=16,5 см; а) 2 пластинки, б) 4 шпильки

$$B_{z} = B_{01}e^{-(z-z_{1})^{2}/(1,44a^{2})} + B_{02}e^{-(z-z_{2})^{2}/(1,44a^{2})}$$

где *а* характеризует градиент магнитного поля;  $z_1$  и  $z_2$  – координаты центров катушек;  $B_{01}$  и  $B_{02}$  – максимальные значения магнитного поля в центре каждого соленоида;  $B_r = -(\partial Bz/\partial z)(r/2)$  – радиальная компонента.

## Численные расчеты

Численные расчеты проведены при следующих параметрах системы и пучка: энергия электронов 27 кэВ; радиус пучка на входе в канал транспортировки  $r_{b0}$ =4 см; ток пучка  $I_b$ =20 кА; радиус трубы дрейфа R=8 см; длина трубы L=18,5 см.

- Рассмотрены три конструкции токопроводов: • стенка рабочей камеры;
- две параллельные пластины длиной 4 и шириной 3 см. Расстояние между пластинами 11 см, ток в каждой пластине 10 кА;
- четыре параллельные шпильки диаметром 0,5 и длиной 4 см. Расстояние между диаметрально противоположными шпильками 11 см. Ток в каждой шпильке 5 кА.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 2–5. Распределения внешнего магнитного поля – на рис. 2, 3. На рис. 2 показаны пространственные распределения компонент магнитного поля токопроводов в сечении z=16,5 см.

На рис. 3 показано распределение магнитного поля соленоидов на оси трубы транспортировки. Координата *z*=0 соответствует плоскости эмиссии электронов.



**Рис. 3.** Зависимость индукции ведущего магнитного поля от длины канала транспортировки

На рис. 4 в канале транспортировки показаны траектории краевых электронов пучка и их проекции на плоскость *X0Y*. Из рис. 4, *a*, видно, что в аксиально-симметричном ведущем поле пучок расширяется на выходе из канала транспортировки благодаря радиальной составляющей магнитного поля на краю соленоида (рис. 3). В магнитном поле токопровода в виде двух пластин пучок имеет фор-



**Рис. 4**. Траектории краевых электронов: а) аксиальносимметричный пучок; б) токопровод – 2 пластинки; в) токопровод – 4 шпильки



Рис. 5. Зависимости продольной скорости v₂ краевых электронов и радиальной координаты краевых электронов от длины канала транспортировки; а) аксиальносимметричный пучок; б) токопровод – 2 пластинки; в) токопровод – 4 шпильки

му прямоугольника на мишени. Длина сторон этого прямоугольника зависит от размеров пластин и их местоположения. В магнитном поле токопровода в виде 4-х шпилек форма пучка на мишени близка к прямоугольной при равных токах в шпильках.

Неоднородное магнитное поле токопровода, как следует из системы уравнений (1), оказывает влияние на все составляющие скорости электронов при их движении к мишени. На рис. 5 показаны зависимости продольной скорости и координаты краевых электронов от координаты *z*. Видно, что в области токопровода в конце трубы транспортировки происходит уменьшение продольной скорости электронов с трансформацией продольной скорости в поперечную.

Из сравнения зависимостей на рис. 5 видно, что при токопроводе в виде пластин на мишени имеет место наибольшее отклонение краевых частиц от начального радиуса пучка на входе, следовательно происходит наибольшая деформация сечения пучка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.V. Low-Energy, High-Current Electron Beams // Laser & Particle Beams. – 2003. – V. 21. – P. 157–174.
- Ozur G.E., Popov S.A., Lazutkin M.N. Losses of Low-Energy, High-Current Electron beam at its Transportation through Plasma Channel // Proc. of the 13<sup>th</sup> Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, Russia, Sept 21–26, 2008. – Tomsk, 2008. – P. 47–50.
- Grigoriev V.P., Koval T.V., Ozur G.E., Nefyodtsev E.V. High-Current, Low-Energy Electron Beam Transportation through Plasma Channel in a Guide Magnetic Field // Proc. of 17<sup>th</sup> Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. – Xi'an, P.R. China, July 6–11, 2008. – Xi'an, 2008. – P. 186–189.

## Выводы

В сильноточных электронных источниках аксиально-неоднородное магнитное поле может быть сформировано обратным токопроводом, сконструированным в виде пластин или шпилек, прикрепленных к мишени. За счет этого при транспортировке низкоэнергетического пучка в канале транспортировки можно осуществлять преобразование формы пучка. В аксиально-неоднородном магнитном поле токопровода преобразование формы пучка из аксиально-симметричного в аксиально-несимметричный во избежание потерь тока целесообразно осуществлять в конце канала транспортировки. Полученные результаты можно использовать в практических целях, когда необходимо с использованием аксиально-симметричной электронной пушки обрабатывать электронным пучком детали прямоугольного сечения или расположенные в прямоугольном сечении изделия.

- Григорьев В.П., Коваль Т.В., Зунг Л.Х. Исследование основных механизмов энергетических потерь транспортируемого электронного пучка в плазменных системах // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 11/2. – С. 101–106.
- Григорьев В.П., Коваль Т.В., Озур Г.Е. Формирование и транспортировка низкоэнергетических сильноточных электронных пучков в плазмонаполненном диоде во внешнем магнитном поле // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – Вып. 1. – С. 103–109.

Поступила 22.04.2010 г.