

контрагированного разряда до 3,5%, вакуумной дуги — до 2%. Полученные зависимости позволяют более обоснованно подходить к выбору геометрии эмиссионных систем источников ионов.

Список литературы

- [1] Галанский В.Л., Крейндель Ю.Е., Окс Е.М. // ТВТ. 1989. Т. 27. № 4. С. 813-814.
- [2] Рябчиков А.И., Арбузов Н.М., Васильев Н.А. // Тез. докл. VIII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Свердловск, 1990. Ч. 1. С. 67-69.
- [3] Бугаев С.П., Окс Е.М., Шанин П.М., Юшков Г.Ю. // ПТЭ. 1990. № 6. С. 125-129.
- [4] Вакуумные дуги / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982.
- [5] Окс Е.М., Шанин П.М., Юшков Г.Ю. // Тез. докл. VIII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Свердловск, 1990. Ч. 1. С. 49-51.
- [6] Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 687-693.
- [7] Галанский В.Л., Крейндель Ю.Е., Окс Е.М. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 5. С. 877-882.

Институт сильноточной электроники
Томск

Поступило в Редакцию
16 июля 1991 г.

В окончательной редакции
10 февраля 1992 г.

10

Журнал технической физики, т. 62, в. 9, 1992

© 1992 г.

ОТРАЖЕНИЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ОТ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.Б.Яковлев

Проведенные экспериментальные исследования [1] показали, что взаимодействие компенсированного электронного пучка с проводящей поверхностью слабее, чем это следует из рассмотренных ранее теоретических моделей [2,3]. Это связано, по-видимому, с тем, что в указанных работах поверхность считалась идеально проводящей и пренебрегалось нестационарностью процесса и влиянием формы траектории пучка на силу взаимодействия. Покажем, как можно учесть последний из перечисленных факторов.

Рассмотрим полностью компенсированный по заряду бесконечно длинный пучок радиуса R_0 , распространяющийся в установившемся режиме по каналу, положение которого не меняется во времени. Ток пучка вызывает возникновение симметричного тока изображения в идеально проводящей плоскости, взаимодействие с которой приводит к искривлению траектории движения пучка. Если радиус R_0 много меньше остальных характерных размеров, то силы самофокусировки больше сил, обусловленных протеканием токов изображения, следовательно, экран способен изменить траекторию пучка, не изменяя его радиуса R_0 .

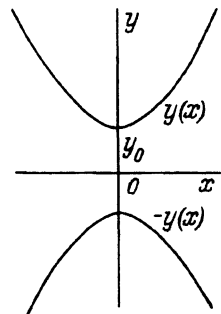


Рис. 1. Система координат и расположение пучка и его "зеркального отражения" в проводящей плоскости.

Движение электрона по каналу пучка, проходящего вблизи идеально проводящей плоскости, в этом случае описывается уравнением

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{e\mathbf{v} \times \mathbf{H}}{c}, \quad (1)$$

где \mathbf{v} — скорость электрона; m , e — масса и заряд электрона; c — скорость света, \mathbf{H} — напряженность магнитного поля.

Система координат выбирается так, что ось пучка лежит в плоскости (x, y) , ось x — вдоль проводящей плоскости, ось y проходит через точку минимального приближения пучка к поверхности (рис. 1).

Пусть траектория пучка задается симметричной функцией $y(x)$, которую необходимо установить в результате решения задачи. Величина магнитного поля dH , создаваемого в точке $(x, y(x))$ элементом тока $I d\mathbf{l}$, определяется по закону Био-Савара-Лапласа

$$dH = \frac{I[dl_x(y(x) - y_1) - dl_y(x - x_1)]}{c[(y(x) - y_1)^2 + (x - x_1)^2]^{3/2}}, \quad (2)$$

где x_1, y_1, dl_x, dl_y — соответственно, координаты центра и проекции на координатные оси элемента $d\mathbf{l}$, I — ток пучка.

Учитывая перпендикулярность магнитного поля $d\mathbf{H}$ плоскости (x, y) , симметрию относительно оси абсцисс траектории пучка и его изображения в проводящей плоскости, а также выражение для элемента $d\mathbf{l}$ через функцию $y(x)$

$$d\mathbf{l} = (dl_x, dl_y) = \frac{dx}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{1/2}} \left(1, \pm \frac{dy}{dx}\right),$$

интегрируя (2), получим величину магнитного поля, создаваемого самим пучком и его изображением, в точке $(x, y(x))$ на траектории пучка

$$H = \frac{I}{c} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{y(x) + y(x_1) + \frac{dy}{dx_1}(x - x_1)}{[(x - x_1)^2 + (y(x) + y(x_1))^2]^{3/2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx_1}\right)^2\right]^{1/2}} \right\} dx_1$$

$$-\frac{y(x) - y(x_1) - \frac{dy}{dx_1}(x - x_1)}{[(x - x_1)^2 + (y(x) - y(x_1))^2]^{3/2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx_1} \right)^2 \right]^{1/2}} \Bigg\} dx_1. \quad (3)$$

Проектируя (1) на ось y , с учетом (3) и постоянства скорости в магнитном поле, получим

$$\frac{A}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} \frac{d^2 y}{dx^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{y(x) + y(x_1) + \frac{dy}{dx_1}(x - x_1)}{[(x - x_1)^2 + (y(x) + y(x_1))^2]^{3/2}} - \frac{y(x) - y(x_1) - \frac{dy}{dx_1}(x - x_1)}{[(x - x_1)^2 + (y(x) - y(x_1))^2]^{3/2}} \right\} \frac{dx_1}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx_1} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (4)$$

где $A = \frac{c^2 m}{e^2 N}$, N — плотность частиц в пучке.

Уравнение (4) представляет из себя интегродифференциальное уравнение, решение которого затруднено. Эти трудности можно обойти, если преобразовать (4) к уравнению относительно кривизны траектории. Вводя угол поворота φ и путь вдоль траектории s , выразим через них x и y

$$x = \int_0^s \frac{ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}}$$

$$y = y_0 + \int_0^s \frac{\operatorname{tg} \varphi}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} ds_2, \quad (5)$$

где y_0 — расстояние минимального сближения пучка с поверхностью.

Тогда из (4) следует

$$A \frac{d\varphi}{ds} = \int_{-\infty}^{+\infty} P ds_1, \quad (6)$$

где

$$P = \frac{2y_0 + \int_0^s \frac{\operatorname{tg} \varphi ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} + \int_0^{s_1} \frac{\operatorname{tg} \varphi ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} + \operatorname{tg} \varphi \int_{s_1}^s \frac{ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}}}{\left[\left(\int_{s_1}^s \frac{ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} \right)^2 + \left(2y_0 + \int_0^s \frac{\operatorname{tg} \varphi ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} + \int_0^{s_1} \frac{\operatorname{tg} \varphi ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} \right)^2 \right]^{3/2}} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$$

$$-\frac{\int_{s_1}^s \frac{\operatorname{tg} \varphi ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} - \operatorname{tg} \varphi \int_{s_1}^s \frac{ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}}}{\left[\left(\int_{s_1}^s \frac{ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} \right)^2 + \left(\int_{s_1}^s \frac{\operatorname{tg} \varphi ds_2}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2}} \right)^2 \right]^{3/2}} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$$

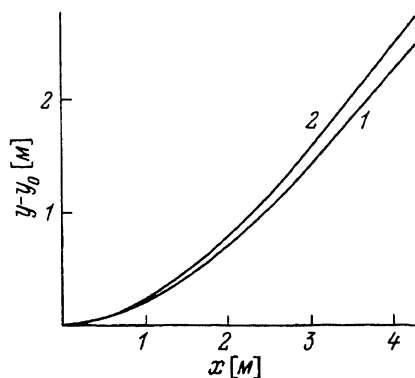


Рис. 2. Сравнение траекторий пучка, рассчитанных по предложенной методике (1) и формулам работы [3] (2).

Расчет проводился для следующих численных значений: минимальное сближение пучка и плоскости $y_0 = 1.5$ см, ток пучка $I = 200$ А, ускоряющее напряжение $U = 10$ кВ.

Проинтегрировав (6) по s , получим уравнение

$$\varphi = \frac{1}{A} \int_0^s ds_2 \int_{-\infty}^{+\infty} P ds_1, \quad (7)$$

которое можно решать известными численными методами. В настоящем случае использовался метод итераций. Зависимость $y(x)$ получалась по найденному $\varphi(s)$ с помощью соотношений (5). Интегрирование по s_1 велось не по бесконечному, а по конечному интервалу, величина которого выбиралась так, чтобы значения $y(x)$ на заданном промежутке $[0, s]$ для выбранного и удвоенного промежутков отличались не более чем на ε . Алгоритм был реализован в виде программы на языке Паскаль на ПЭВМ РС/АТ-286.

Результаты проведенных расчетов показали совпадение результатов с полученными в работе [3] для случая слабого взаимодействия с поверхностью и наличие эффекта уменьшения отклонения от поверхности по сравнению с данными [3] при более сильном взаимодействии (рис. 2). В предложенной модели можно учесть и неидеальную проводимость поверхности, заменив зеркально-симметричное изображение пучка на задаваемое формулами работы [4].

Автор благодарит Е.К.Колесникова и А.Г.Гейнца за внимание и помощь в работе.

Список литературы

- [1] Луденко А.Н., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П. //ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 12. С. 2613-2619.
- [2] Link W. //Trans. IEEE. 1967. Vol. NS-14. N 3. P. 777-789.
- [3] Ходатаев К.В. //Атомная энергия. 1972. Т. 32. № 5. С. 379-381.
- [4] Тирковский Я. // Техническая электродинамика. М., 1974. 488 с.

С.-Петербургский университет

Поступило в Редакцию
7 августа 1991 г.