

УДК 621.384.6

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМОКАТОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

М. Б. Гойхман, А. В. Громов, Н. Ф. Ковалёв, А. В. Палицин

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Решена задача о токе электронного пучка в планарной двухэлектродной пушке с движущимся кромочным магнитоизолированным катодом при условии неограниченной эмиссионной способности катодной кромки. Проведено сравнение вольт-амперных характеристик систем с неподвижным и движущимся катодами. Получены зависимости относительной разности токов и энергии движения электронов для систем с неподвижным и движущимся катодами от величины ускоряющего напряжения при различной скорости движения катода. Показано, что движение эмитирующей кромки со скоростями, превышающими 10^8 см/с, может существенно изменить параметры электронных пучков в пушках с ускоряющим напряжением до 0,5 МВ. Полученные соотношения могут быть использованы в качестве основы дополнительных средств диагностики процессов в прикатодной плазме и приближённо применимы для описания движущихся виртуальных катодов.

Токовые характеристики взрывоэмиссионных электронных пушек обычно рассчитываются по формулам, полученным для стационарных систем, в которых не учитывается движение эмитирующей катодной плазмы [1, 2]. Однако поскольку скорость движения эмиссионной поверхности может достигать довольно большой величины ($V_0 > 10^7$ см/с), то предположение о стационарности нуждается в обосновании. С этой целью в настоящей работе проведено сравнение вольт-амперных характеристик систем с плоским неподвижным лезвийным катодом и катодом, движущимся между двумя идеально проводящими плоскостями в направлении движения электронов пучка (рис. 1). Предполагается, что:

- 1) направляющее магнитное поле \mathbf{H}_0 однородно и велико настолько, что поперечными движениями электронов можно пренебречь ($V_{\perp} = 0$);
- 2) эмиссионная способность катодной кромки неограниченно велика;
- 3) пучок тонкостенный, ленточный и расположен в плоскости симметрии, т. е. на одинаковом расстоянии a от ограничивающих плоскостей, потенциал которых по отношению к катоду одинаков и равен U ;
- 4) на достаточном удалении от кромки катода пучок переходит в однородное состояние, в направлении оси z система безгранична.

В системе координат, движущейся вместе с катодом, зависимость тока пучка I'_f от ускоряющего напряжения U' определяется формулами [2]

$$I'_f = I_0 \frac{\gamma'_a - \gamma'_f}{2\pi a} \frac{\sqrt{(\gamma'_f)^2 - 1}}{\gamma'_f}, \quad (1)$$

$$\gamma'_a = 1 + \frac{eU'}{mc^2}, \quad (2)$$

$$\gamma'_f = \sqrt{2\gamma'_a + 1/4} - 1/2, \quad (3)$$

в которых $I_0 = mc^3/e$ — ток, в системе СИ равный 17,04 кА,

$$\gamma'_f = \left(1 - \frac{(V'_f)^2}{c^2}\right)^{-1/2} \quad (4)$$

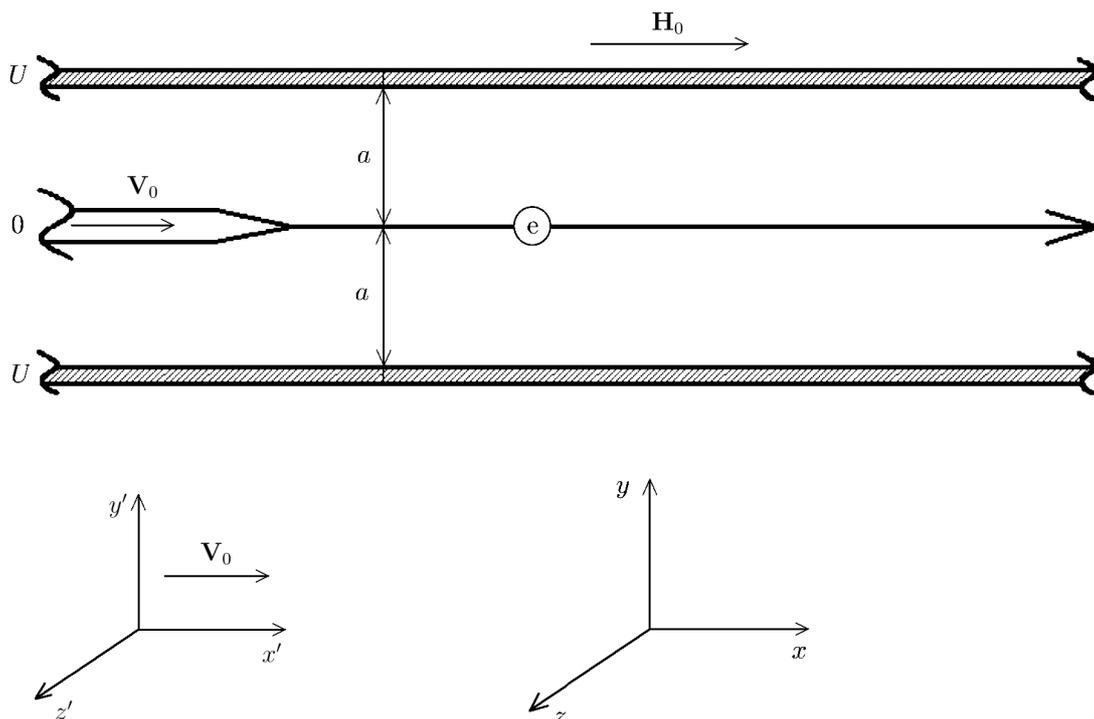


Рис. 1. Схематическое изображение электронно-оптической системы с движущимся катодом

— релятивистский фактор электрона, движущегося со скоростью V_f' , m и $e > 0$ — масса покоя электрона и элементарный заряд соответственно, c — скорость света. Здесь и далее формулы и соотношения записаны в гауссовой системе единиц. Величины, относящиеся к сопровождающей системе координат, отмечены верхним штрихом.

Для построения вольт-амперной характеристики в лабораторной системе координат удобно воспользоваться формулами пересчёта

$$U = \gamma_0 \left(U' + \frac{2\pi a}{c} \beta_0 I_f' \right), \tag{5}$$

$$I = \gamma_0 \left(I_f' + \frac{c}{2\pi a} \beta_0 U' \right), \tag{6}$$

полученными из законов преобразования полей [3] и соотношений для компонент магнитного поля $H_z = 2\pi I_x/c$, $H_z' = 2\pi I_x'/c$. В (5) и (6) $\gamma_0 = (1 - \beta_0^2)^{-1/2}$, $\beta_0 = V_0/c$, V_0 — скорость перемещения катода. Скорость электронов в сформированном электронном пучке при этом будет равна [3]

$$V = \frac{V_f' + V_0}{1 + \frac{V_f' V_0}{c^2}}. \tag{7}$$

В случае, когда в лабораторной системе координат катод неподвижен, при том же напряжении (5)

$$U = \frac{mc^2}{e} (\gamma_a - 1) \tag{8}$$

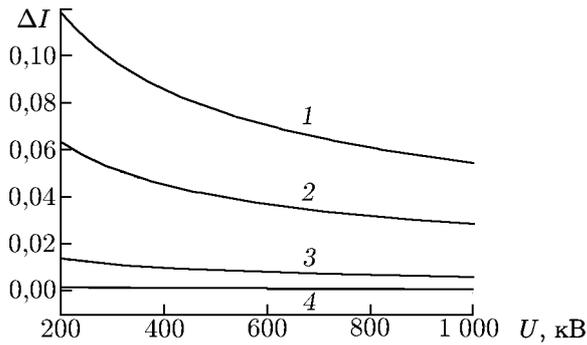


Рис. 2. Зависимость относительной разности токов для систем с движущимся и неподвижным катодами от величины ускоряющего напряжения при различной скорости движения катода: кривая 1 соответствует $V_0 = 10^9$ см/с, кривая 2 — $V_0 = 5 \cdot 10^8$ см/с, кривая 3 — $V_0 = 10^8$ см/с, кривая 4 — $V_0 = 10^7$ см/с

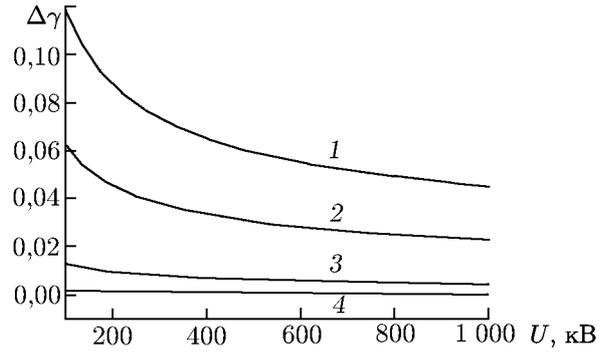


Рис. 3. Зависимость относительной разности энергии движения для систем с движущимся и неподвижным катодами от величины ускоряющего напряжения при различной скорости движения катода; обозначения кривых такие же, как на рис. 2

ток пучка I_f и скорость электронов V_f отличаются от (6) и (7):

$$I_f = I_0 \frac{\gamma_a - \gamma_f}{2\pi a} \frac{\sqrt{\gamma_f^2 - 1}}{\gamma_f}, \quad (9)$$

$$\gamma_f = \sqrt{2\gamma_a + 1/4} - 1/2, \quad (10)$$

$$V_f = c \sqrt{1 - \gamma_f^{-2}}. \quad (11)$$

В рамках принятых моделей вольт-амперные характеристики (8)–(10) и (1)–(3), (5), (6) одинаково точны, поэтому их сравнение корректно во всей области изменения основных величин a , U , I и I_f . На рис. 2 и 3 представлены зависимости относительных разностей токов пучков

$$\Delta I = \frac{I - I_f}{I} \quad (12)$$

и энергий движения электронов

$$\Delta \gamma = \frac{\gamma - \gamma_f}{\gamma - 1} \quad (13)$$

от ускоряющего напряжения U при разных скоростях движения катода V_0 .

Если катод движется в направлении движения электронов, то величины (12) и (13) положительны:

$$\Delta I > 0, \quad \Delta \gamma > 0,$$

и, соответственно, ток пучка I больше тока Федосова I_f , а разность $I_{\text{lim}} - I$, где

$$I_{\text{lim}} = I_0 \frac{(\gamma_a^{2/3} - 1)^{3/2}}{2\pi a} \quad (14)$$

— предельный ток, становится меньше. С уменьшением $I_{\text{lim}} - I$, возможно, связаны трудности экспериментов по измерению тока Федосова, предпринятые в ряде работ [4, 5]. Как видно из рисунков, в рассмотренной области параметров движение катодов с $V_0 < 10^8$ см/с не приводит

к заметным изменениям вольт-амперных характеристик магнитоизолированных пушек с кромочными катодами. Не намного изменяется в этом случае и энергия движения электронов (ср. (7) и (11)) в сформированном пучке. Однако, если учесть, что движение эмитирующей границы неоднородно и скорость V_0 у кромки катода увеличивается из-за роста плотности плазмы, то рассматриваемые эффекты могут существенно изменить как вольт-амперную характеристику, так и энергию движения электронов. Возможны также кратковременные увеличения скорости движения плазмы, т. е. флуктуации, что может привести к значительным колебаниям тока пучка или какой-либо из его фракций. Оба приведённых примера показывают, что полученные соотношения могут быть использованы в качестве основы дополнительных средств диагностики процессов в прикатодной плазме.

В заключение уместно отметить, что полученные формулы приближённо применимы к описанию движущихся виртуальных катодов, скорость перемещения которых может превышать, причём существенно, скорость движения плазмокатодов, а также может быть направлена в противоположную сторону ($\beta_0 < 0$), т. е. навстречу движению электронов пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С. П., Ильин В. П., Кошелев В. И. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 5.
2. Федосов А. И., Литвинов Е. А., Беломытцев С. Я. и др. // Изв. вузов. Физика. 1977. № 10. С. 134.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля. М.: Физматлит, 2003. 536 с.
4. Беломытцев С. Я., Гришков А. А., Кицанов С. А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 2. С. 22.
5. Беломытцев С. Я., Гришков А. А., Кицанов С. А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 22. С. 74.

Поступила в редакцию 29 июня 2010 г.; принята в печать 20 июля 2010 г.

INFLUENCE OF THE MOTION OF THE PLASMA CATHODE ON THE CHARACTERISTICS OF THE MAGNETICALLY INSULATED ELECTRON GUN

M. B. Goikhman, A. V. Gromov, N. F. Kovalev, and A. V. Palitsin

We solve the problem of the electron beam current in a planar two-electrode gun with a moving magnetically insulated edge cathode under the conditions of unbounded emissivity of the cathode edge. Current-voltage characteristics of the systems with a stationary and a moving cathode are compared. The dependences of the relative difference of the currents and electron motion energy on the accelerating voltage at different velocities of the cathode motion are found for the systems with a stationary and a moving cathode. It is shown that the motion of the emitting edge with the velocities exceeding 10^8 cm/s can change significantly the parameters of the electron beams in the guns with an accelerating voltage of up to 0.5 MV. The found relationships can be used as a basis for additional means of diagnostics of the processes in the near-cathode plasma, and can be used approximately to describe moving virtual cathodes.