

10;12

Структура пикосекундного электронного пучка внутри вакуумного диода

© К.А. Желтов, И.Г. Турундаевская

Научно-исследовательский институт импульсной техники, Москва

Поступило в Редакцию 25 марта 1999 г.

Определена структура пикосекундного (~ 150 ps) электронного пучка в промежутке катод–анод вакуумного диода. Электронный пучок рассматривается в виде плоских квазичастиц с определенной плотностью заряда, следующих одна за другой через равные интервалы времени. Показано, что расширение концентрических слоев пучка под воздействием собственного электрического и магнитного полей существенным образом зависит от силы тока. Экспериментальное подтверждение расчетных оценок иллюстрируется регистрацией структуры электронного пучка на аноде с помощью пленки, чувствительной к электронному излучению.

В сильноточных ускорителях электронов прямого действия, в которых принцип формирования пикосекундного ($\sim 10^{-10}$ s) всплеска высокого напряжения основан на разряде короткого (~ 1 cm) накопителя на длинную линию через сильно перенапряженный (~ 700 kV/mm) искровой промежуток [1], распространяющийся по линии к вакуумному диоду, падающий импульс U может быть описан таким соотношением:

$$U = U_m \cdot \sin^2(\pi t / 2T), \quad 0 \leq t \leq 2T, \quad (1)$$

где U_m — амплитуда падающего пикосекундного импульса, T — длительность на половине амплитудного значения.

В разработанных к настоящему времени пикосекундных ускорителях амплитуда падающего импульса, как правило, лежит в интервале $350 \div 700$ kV, а длительность составляет в среднем ~ 150 ps при силе тока электронного пучка, изменяющегося от сотен ампер до нескольких килоампер. При необходимости вывода электронного пучка наружу через "прозрачный" анод обычно используются высокоимпедансные вакуумные диоды, у которых "внутреннее сопротивление" значительно превышает волновое сопротивление длинной линии ($Z_{\text{л}} \ll Z_{\text{вд}}$).

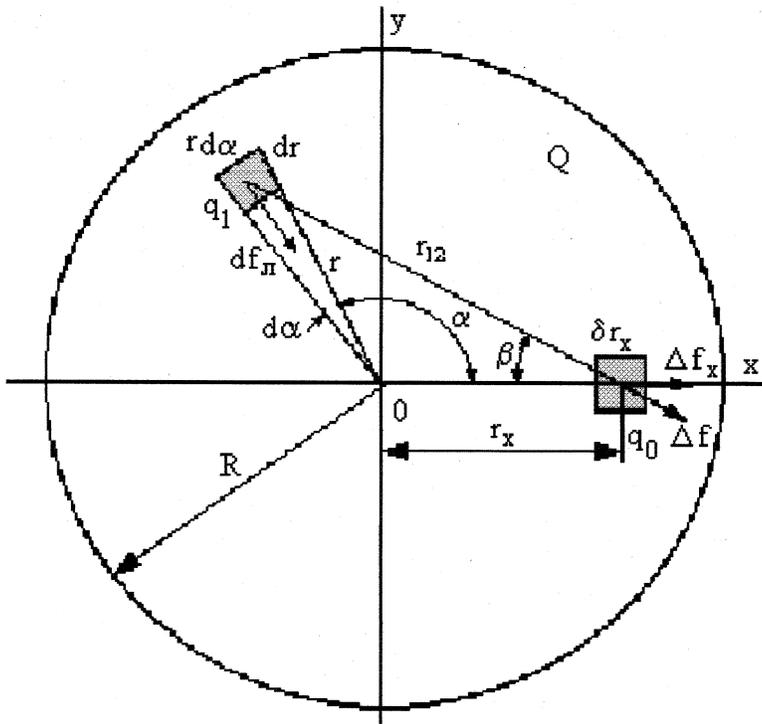


Рис. 1. Поперечное сечение электронного пучка на поверхности катода — квазичастица в начальный момент времени: R — радиус катода, r_x — начальный радиус слоя пучка.

Для таких диодов характерны максимально возможные расстояния между катодом и анодом (~ 9 mm) и относительно небольшая площадь катода. Высокий импеданс способствует формированию на промежутке катод-анод отраженного импульса одноименной полярности, благодаря чему происходит практически удвоение ускоряющего напряжения по отношению к амплитуде падающего. При этом энергия электронного пучка в ряде случаев может существенно превысить уровень 1 MeV.

Структура электронного пучка внутри вакуумного диода [2–4] обусловлена действием электрического (кулоновского) и магнитного (сила Лоренца) полей. Пикосекундный всплеск тока пучка быстрых электронов, пропорциональный разности падающего и отраженного импульсов напряжений и при больших коэффициентах отражения (β), описывается примерно таким же соотношением, что и (1), причем амплитуда тока будет равна $I_m = U_m(1 - \beta)$. При численном моделировании зависимость тока пучка от времени разбивается на некоторое число интервалов (~ 15), при котором объемная плотность заряда в каждом сохраняется примерно постоянной. Электроны в каждом интервале объединяются в одну квазичастицу с суммарным электрическим зарядом в этом интервале. Электронный пучок, таким образом, представляется в виде следующих друг за другом квазичастиц с одинаковыми интервалами, но с разной плотностью распределенного заряда.

Электростатическое расталкивание распределенного заряда Q квазичастицы (рис. 1) обусловлено интегральным воздействием кулоновских сил Δf на элемент заряда q_0 от всех элементов заряда q_1 :

$$\Delta f = q_0 \cdot q_1 / 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{12}^2, \quad (2)$$

где $q_1 = \rho_v r d\alpha dr$, $q_0 = (\delta r_x)^2 \rho_v$, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m, ρ_v — плотность заряда распределенных электронов.

Суммарная сила $\sum \Delta f$ в релятивистском случае при $\Delta f \parallel v$ [5] от всех элементов q_1 пропорциональна массе m_q заряда q_0 и ускорению dv/dt , где v — мгновенная скорость:

$$\sum \Delta f = m_q (1 - v^2/c^2)^{-3/4} dv/dt. \quad (3)$$

Здесь $m_q = (\delta r_x)^2 m_v$, $m_v = \rho_v (m_e/e)$ — плотность массы распределенного заряда ($m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C — масса и заряд электрона).

Для квазичастицы, соответствующей амплитуде тока пучка (I_m) при интервале $\Delta\tau$ ($\sim 10^{-11}$ s), распределенная плотность заряда $\rho_v = I_m \Delta\tau / \pi R^2$, где R — радиус катода вакуумного диода, причем $\Delta\tau \approx R/c$, является условием, при котором исключается взаимное влияние квазичастиц. После соответствующих преобразований выражения (3) с учетом (2) получим систе-

му уравнений для электростатического расширения распределенного заряда:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho_v^2}{2\pi\epsilon_0} \int_0^\pi \int_0^R \frac{(r_x - r \cos \alpha) r d\alpha dr}{(r^2 + r_x^2 - 2rr_x \cos \alpha)^{3/2}} &= \frac{m_v}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}} \cdot \frac{dv}{dt}, \\ V &= \frac{dx}{dt}, \end{aligned} \right\} (4)$$

где r_x — радиус слоя электронного пучка, x — координата расширения, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света.

Магнитное поле, сжимающее параксиальный электронный пучок, обусловлено силой Лоренца, $df_{\text{л}} \approx q_1[cB]$, причем магнитная индукция B на границе слоя пучка радиуса r определится таким соотношением:

$$B = \frac{\mu_0 r}{2\pi R^2} I_m. \quad (5)$$

Откуда сила Лоренца $F_{\text{л}}$ для соответствующего слоя:

$$F_{\text{л}} = \int_0^\pi \int_0^{r_x} \frac{\mu_0 I_m}{\pi R^2} c \rho_v r dr d\alpha. \quad (6)$$

Система уравнений, учитывающая воздействие электрического и магнитного поля и позволяющая определить расширение слоев электронного пучка внутри вакуумного диода и на аноде, имеет такой вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{R^2 \rho_v^2}{2\epsilon_0} \int_0^\pi \int_0^R \frac{(r_x - r \cos \alpha) r d\alpha dr}{(r^2 + r_x^2 - 2rr_x \cos \alpha)^{3/2}} - \frac{\mu_0 c \rho_v I_m}{\pi R^2} \int_0^\pi \int_0^{r_x} r^2 dr d\alpha \\ = \frac{\pi R^2 m_v}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}} \cdot \frac{dv}{dt}, \\ v &= \frac{dx}{dt}. \end{aligned} \right\} (7)$$

Результаты расчета расширения электронного пучка внутри вакуумного диода с холодным плоским катодом радиусом $R = 2$ мм и промежутком катод–анод 9 мм представлены на рис. 2, а. Расширение

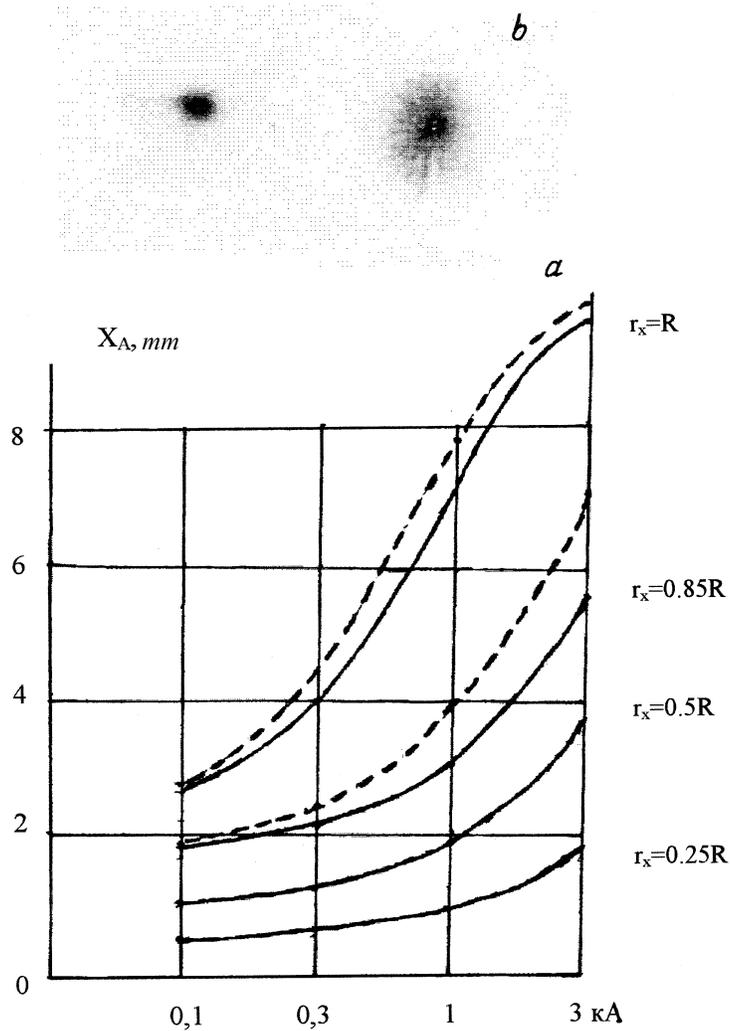


Рис. 2. *a* — зависимость радиуса слоя пучка (X_A) на аноде от максимального тока внутри вакуумного диода для различных слоев (r_x); *b* — структура электронного пучка на аноде при токах ~ 0.3 и ~ 2 кА (длительность пикосекундного импульса $T \sim 150$ ps).

пучка вблизи анода (X_A) существенным образом зависит от максимального тока I_m , протекающего между катодом и анодом. Внутренние слои пучка радиусом $r_x < 0.5R$ расширяются слабо, внешние слои ($r_x \approx 0.85R$) и особенно граничные ($r_x \approx R$) испытывают значительное электростатическое расталкивание. Расширение в основном обусловлено электростатическими силами. Влияние магнитного поля проявляется в меньшей степени. Иллюстрацией тому служит семейство кривых на графике (рис. 2, *a*) для слоев пучка $r_x = 0.85R$ и $r_x = R$. Пунктиром показаны расширения (X_A) при воздействии только электростатических сил, сплошной линией отмечены совместные действия с магнитным полем. При малых токах электронного пучка (< 0.3 кА) его расширение относительно невелико, но при токах ~ 1 кА и более граничные и примыкающие к ним слои существенно расходятся. Экспериментальное подтверждение расчетных оценок приведено на рис. 2, *b*, где показана структура (след) электронного пучка на аноде, зарегистрированная чувствительной пленкой, расположенной на обратной стороне анода, в качестве которого используется тонкостенный бериллий или титан, прозрачные для высокоэнергетических электронов. При максимальном токе пучка ~ 0.3 кА след практически соответствует площади катода (расходимость пучка невелика), но при токе ~ 2 кА след покрывает площадь значительно большего радиуса, чем радиус катода, — пучок сильно расширяется не только за счет граничных, но и прилегающих к ним внутренних слоев.

Приведенные расчетные оценки могут быть полезны при определении импедансов вакуумного диода в пикосекундных каналах электронного излучения сильноточных ускорителей прямого действия.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра по проекту № 510–97, финансирующая организация — Европейское сообщество.

Список литературы

- [1] Желтов К.А., Коробков С.А., Петренко А.Н., Шалиманов В.Ф. // ПТЭ. 1990. № 1. С. 37–41.
- [2] Рухадзе А.А., Богданкевич Л.А., Росинский С.У., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1980.

- [3] Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977.
- [4] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
- [5] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: ГИФМЛ, 1963. С. 488.