

01;04;10

О времени жизни электронного пинча в сильноточных диодах со стержневым анодом

© С.Я. Беломытцев, В.В. Рыжов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: ryzhov@to.hcei.tsc.su

Поступило в Редакцию 13 февраля 2001 г.

Показано, что в сильноточных коаксиальных диодах со стержневым анодом ток магнитной самоизоляции зазора примерно в два раза больше внешнего критического тока магнитной изоляции $J_S \approx 2J_C$. На основании этого предложена модель, согласно которой квазистационарное состояние электронного пинча в сильноточных диодах объясняется изменением условия магнитной изоляции зазора при образовании пинча. Это позволяет вычислить время жизни пинча Δt . Результаты вычислений величины Δt по осциллограммам, полученным на ускорителе Gamble I, удовлетворительно согласуются с экспериментальным значением времени жизни пинча в коаксиальном диоде со стержневым анодом.

Сильноточные диоды со стержневым анодом (Rod Pinch Diodes) были разработаны и экспериментально исследованы в Naval Research Laboratory (USA) в 1978 г. на ускорителе Gamble I [1]. В настоящее время они вновь привлекли к себе внимание как мощные источники рентгеновского излучения, обладающие рекордной по сравнению с другими источниками яркостью излучения [2,3]. Эксперименты показали [1,2], что в этих диодах при увеличении тока формируется электронный пинч, который транспортируется вдоль стержневого анода и затем высаживается на его острие, после чего наступает квазистационарная стадия работы диода, для которой характерна стабильность импеданса, а при слабом изменении напряжения и постоянство тока диода [1]. Именно на этой стадии наблюдается вспышка рентгеновского излучения высокой яркости. Длительность этой стадии (время жизни пинча) является важной характеристикой, определяющей эффективность рентгеновского излучения диода.

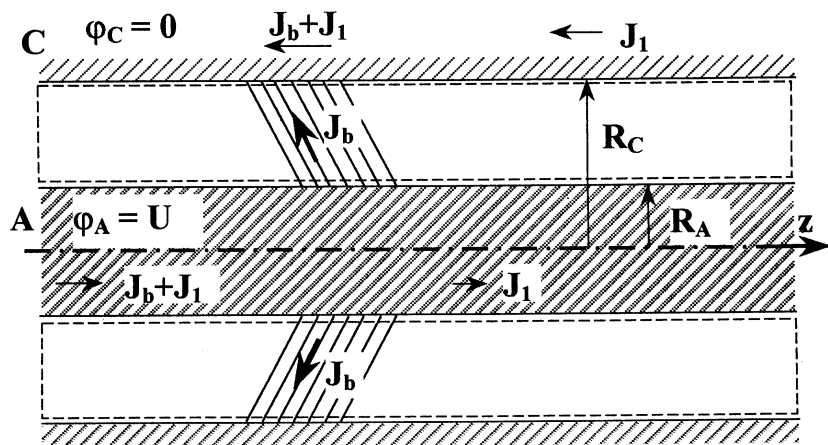


Рис. 1. Схема к вычислению токов магнитной изоляции: А — анод, С — катод. Пунктиром выделен объем, для которого записан закон сохранения z -компоненты импульса.

В работе [1] образование пинча в условиях магнитной самоизоляции в сильноточных диодах со стержневым анодом объясняется достижением в зазоре собственным магнитным полем пучка критического значения. Заметим, что в этом случае электронный пинч может существовать только при нарастающем токе, так как при постоянстве тока диода и уменьшении зазора за счет движения анодной и катодной плазмы собственное магнитное поле немедленно станет ниже критического и время жизни пинча $\Delta t = 0$. Для объяснения данного противоречия в [1] постулируется, что при образовании пинча собственное магнитное поле тока тормозит анодную плазму, поэтому критический ток магнитной изоляции стабилизируется, а время жизни пинча определяется временем развития неустойчивости анодной плазмы, удерживаемой магнитным полем. Но это объяснение не является удовлетворительным хотя бы потому, что движется и катодная плазма, зазор уменьшается и критический ток растет.

В данной работе предлагается объяснение квазистационарного состояния пинча, в котором не требуется предположения о замедлении кольцевой областью эмиссии на катоде (рис. 1). В стационарном

состоянии z -компонента импульса поля и частиц в объеме, ограниченном пунктирной линией, постоянна. Следовательно, поток z -компоненты импульса через границу объема равен нулю:

$$\frac{1}{8\pi} \int_{R_A}^{R_C} \left[\frac{2(J_b + J_1)}{cr} \right]^2 2\pi r dr - \frac{1}{8\pi} \int_{R_A}^{R_C} \left[\frac{2J_1}{cr} \right]^2 2\pi r dr - P_z = 0, \quad (1)$$

где R_A, R_C — радиусы анода и катода; P_z — поток z -компоненты импульса, приносимый электронами на анод; c — скорость света в вакууме; $2(J_b + J_1)/cr$ — напряженность магнитного поля на левой границе объема, $2J_1/cr$ — на правой, J_b — ток пучка электронов, J_1 — внешний ток. Вкладом магнитного поля ионного тока пренебрегаем, полагая, что он много меньше электронного, а вклад ионов в z -компоненту импульса не учитываем, считая, что ионы слабо отклоняются в магнитном поле.

Найдем максимальное значение токов J_b и J_1 , выше которого невозможно стационарное протекание тока J_b без пересечения пучком электронов (или частью его) торцевой границы выделенного объема. Очевидно, что это соответствует случаю, когда все электроны на аноде имеют только z -компоненту скорости, т. е.

$$P_z = \frac{J_b}{e} mc \sqrt{\gamma^2 - 1}, \quad (2)$$

где $\gamma = 1 + eU/mc^2$, e и m — заряд и масса покоя электрона, U — напряжение на диоде. Подставляя (2) в (1), имеем

$$J_b + 2J_1 = J_0 \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\ln(R_C/R_A)}, \quad (3)$$

где $J_0 = mc^3/e \approx 17$ кА.

Если ток пучка $J_b \ll J_1$, то замагничивание его внешним током J_1 наступает при достижении им известного значения критического тока магнитной изоляции J_c в одноэлектронном приближении:

$$J_1 = J_c = \frac{J_0}{2} \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\ln(R_C/R_A)}. \quad (4)$$

В случае магнитной самоизоляции ($J_1 = 0$) из (3) следует

$$J_b = J_s = J_0 \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\ln(R_C/R_A)}. \quad (5)$$

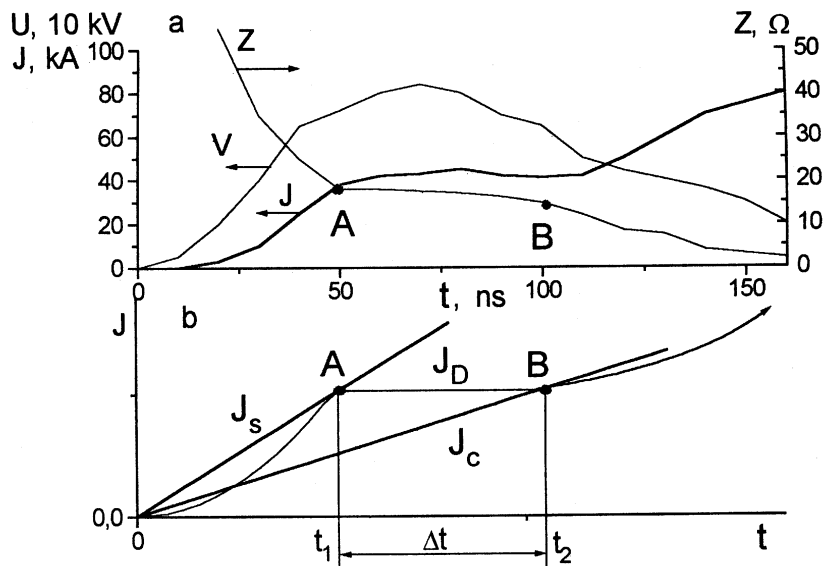


Рис. 2. Типичные осциллограммы тока J , напряжения V и кривая импеданса Z в диоде со стержневым анодом ($R_A = 0.08$ см, $R_C = 0.58$ см) для ускорителя Gamble I, взятые из работы [1] (a) и схематический график зависимости тока диода J_D , тока магнитной самоизоляции J_s и критического тока J_c от времени (b).

Следовательно, ток самоизоляции J_s в два раза больше критического тока J_c

$$J_s = 2J_c. \quad (6)$$

Реальные зазоры в диодах конечны вдоль оси z . Влияние границ зазоров изменит токи магнитной изоляции для них и соотношение между ними, поэтому для реальных диодов соотношение (6) следует считать приближенным.

В работе [3] на основе экспериментальных данных сделан вывод о том, что в сильноточных диодах со стержневым анодом стационарный режим пинчевания пучка наблюдается при токах $J_D \approx 2J_c$, что согласуется с нашими результатами.

На основании полученного соотношения между критическим током и током самоизоляции пучка можно предложить следующую модель, определяющую время жизни электронного пинча. Электронный пучок переходит в состояние пинча в момент времени $t = t_1$ (точка A рис. 2) при выполнении условия магнитной самоизоляции $J_D = J_s$ (5). Начиная с этого момента, ток диода, протекающий по анодному стержню, для зазора играет роль внешнего тока. Следовательно, в начальной стадии пинча зазор оказывается перемагнитненным и магнитное поле в нем в два раза больше критического. Поэтому условие магнитной изоляции в зазоре будет выполняться до тех пор, пока нарастающее в результате движения плазмы критическое значение тока (кривая J_c на рис. 2, b) не сравняется с током диода $J_D = J_c$ в момент времени $t = t_2$ (точка B на рис. 2). Таким образом, время жизни пинча $\Delta t = t_2 - t_1$.

В работе [1] приведены осциллограммы тока, напряжения и график импеданса диода со стержневым анодом для установки Gamble I (рис. 2, a). Полагая, что анодная и катодная плазма движется с одинаковой и постоянной скоростью, и считая, что время от начала токопрохождения до переключения зазора составляет $t \approx 160$ ns, при заданной величине зазора находим скорость движения плазмы и ее положение в момент времени t_1 . Если предположить, что стадия пинча соответствует постоянному во времени импедансу диода [1], то из рис. 2, a следует, что время жизни пинча составляет $\Delta t_{\text{exp}} \approx 50$ ns (отрезок AB на графике импеданса рис. 2, a). Так как в это время напряжение на диоде примерно постоянно, то рост величины критического тока определяется изменением во времени радиусов границ катодной и анодной плазмы. Следовательно, за время Δt величина $\ln(R_C/R_A)$ уменьшается в два раза. Отсюда легко находим время жизни пинча $\Delta t \approx 57$ ns, которое удовлетворительно согласуется с Δt_{exp} .

Таким образом, квазистационарное состояние электронного пинча в сильноточном коаксиальном диоде со стержневым анодом объясняется изменением условия магнитной изоляции зазора при образовании пинча. Образование пинча происходит в режиме магнитной самоизоляции при достижении током диода значения, примерно в два раза выше критического $J_D = J_s \approx 2J_c$. Условие магнитной изоляции зазора в квазистационарном режиме пинча обеспечивается током диода при условии $J_D \geq J_c$.

Список литературы

- [1] *Mahaffey R.A., Golden J., Goldstein A., Cooperstein G.* // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 9. P. 795–797.
- [2] *Cooperstein G., Commisso R.J., Hinshelwood D.D.* et al. // Proc. 12-th Int. Conf. High-Power Particle Beams. 1998. V. 1. P. 31–34.
- [3] *Maenchen J., Menge P.R., Rovang D.C.* et al. // Intense Electron Beam for Radiography. Paper presented on the 12th Symposium on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 24–29 Sept., 2000.