

10;12

Ток трубчатого электронного пучка за виртуальным катодом

© С.Я. Беломытцев, А.А. Гришков, С.А. Кицанов,
С.Д. Коровин, С.Д. Полевин, В.В. Рыжов

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

Поступило в Редакцию 13 августа 2004 г.

Экспериментально на установке СИНУС-7 исследована зависимость проходящего тока замагниченного пучка электронов кольцевого сечения I_{out} в однородной трубе транспортировки от инжектируемого тока I_{inj} . Пучок электронов инжектировался из трубы меньшего радиуса с током выше тока Федосова для исследуемой трубы $I_{inj} \geq I_F$. Показано, что в пределах ошибки измерений виртуальный катод (ВК) образуется при достижении инжектируемым током предельного значения для исследуемой трубы I_{lim} . При этом проходящий за ВК ток примерно равен предельному $I_{out} \approx I_{lim}$.

Хорошо известно, что в случае транспортировки пучка электронов через плоский зазор при превышении током инжектируемого пучка I_{inj} значения второго критического тока $I_{inj} = I_{lim} = I_{2crit}$ в зазоре образуется виртуальный катод (ВК) и проходящий за ВК ток I_{out} скачком уменьшается. Таким образом, при транспортировке пучка электронов через плоский зазор при наличии ВК проходящий ток всегда меньше предельного $I_{out} < I_{lim}$.

В работах [1,2] утверждается, что подобным же образом ведет себя проходящий ток при транспортировке замагниченного пучка электронов кольцевого сечения в цилиндрической трубе дрейфа. В то же время многочисленные данные численного моделирования транспортировки электронных пучков в составных трубах дрейфа и теоретические работы опровергают такую аналогию [3–5]. Для выяснения этого вопроса в работе проведены эксперименты по измерению тока за ВК при транспортировке замагниченного пучка электронов кольцевого сечения в цилиндрической трубе дрейфа.

Целью данных экспериментов являлись относительные измерения тока пучка в трубе дрейфа в режиме с ВК и в режиме полного

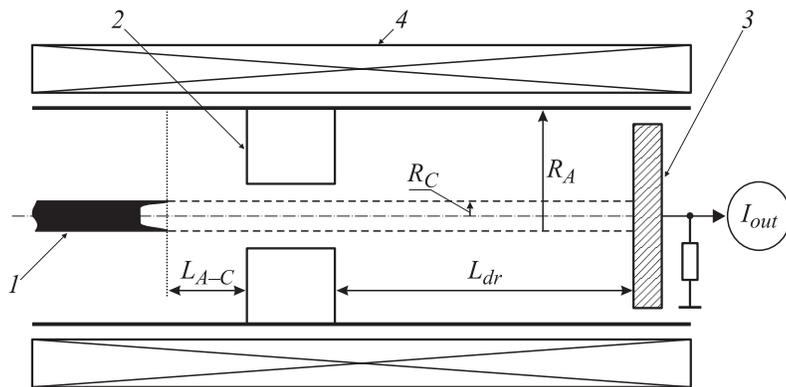


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анодная вставка, 3 — коллектор, 4 — соленоид.

токопрохождения. Экспериментальные исследования проводились на сильноточном электронном ускорителе СИНУС-7 [6] (напряжение на катоде до 2 MV, ток в диоде до 20 kA, длительность импульсов тока — 50 ns). Схема эксперимента приведена на рис. 1. Электронный пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией (КДМИ) и через анодную вставку инжектировался в трубу дрейфа. Электроны эмитировались со взрывоэмиссионного цилиндрического графитового катода радиусом $R_C \approx 8.5$ mm и толщиной кромки 0.5 mm. Для формирования тонкостенного трубчатого пучка напряженность однородного продольного магнитного поля в области формирования пучка и трубе дрейфа выбиралась достаточно высокой ~ 15 kOe. Длина анодной вставки и радиус отверстия в ней составляли 55 и 12 mm соответственно.

Длина трубы дрейфа в экспериментах фиксировалась $L_{dr} \approx 250$ mm и значительно превышала ее радиус $R_A \approx 43$ mm. Радиус анода в КДМИ также составлял 43 mm. Ток в диоде варьировался изменением расстояния между катодом и анодной вставкой (L_{A-C}), при этом напряжение на катоде поддерживалось постоянным. Токи в диоде и пространстве дрейфа измерялись с помощью низкоиндуктивных омических шунтов.

Типичные осциллограммы напряжения на катоде и тока пучка в трубе дрейфа приведены на рис. 2. Видно, что напряжение на катоде и ток пучка в течение импульса изменялись незначительно.

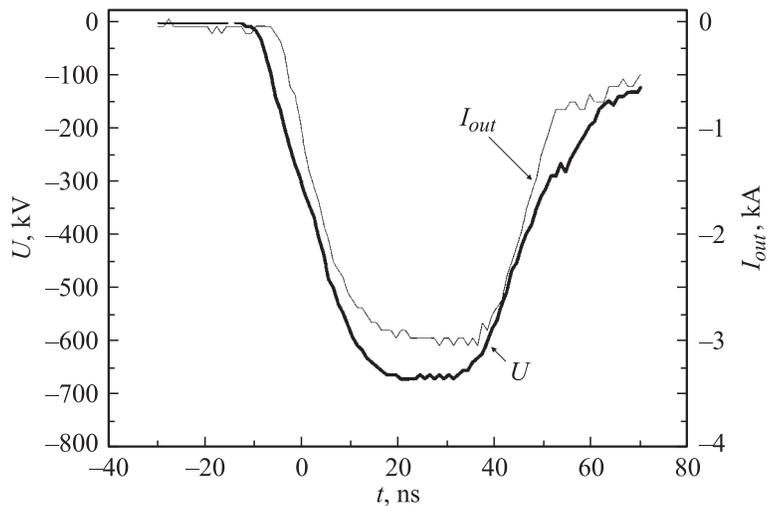


Рис. 2. Типичные осциллограммы напряжения на катоде и тока пучка в трубе дрейфа.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость относительной величины тока пучка в пространстве дрейфа от L_{A-C} при напряжении на катоде около 700 kV. Там же приведены результаты численного моделирования с использованием РИС-кода КАРАТ [7]. Геометрия КДМИ и пространства дрейфа была аналогична используемой в эксперименте. При больших $L_{A-C} > 60-70$ mm ток пучка за ВК I_{out} совпадает с инжектируемым током I_{inj} и равен току Федосова I_F

$$I_F = \frac{I_0}{2 \ln(R_C/R_A)} \frac{(\Gamma - \gamma_F) \sqrt{\gamma_F^2 - 1}}{\gamma_F}, \quad (1)$$

где $I_0 = mc^3/e$, $\Gamma = 1 + eU/mc^2$, m , e — масса электрона и его заряд, c — скорость света в вакууме, U — электростатический потенциал анодной трубы, $\gamma_F = -0.5 + \sqrt{2\Gamma + 0.25}$ — релятивистский фактор в пучке с током Федосова, который получен для тонкого пучка в КДМИ [8].

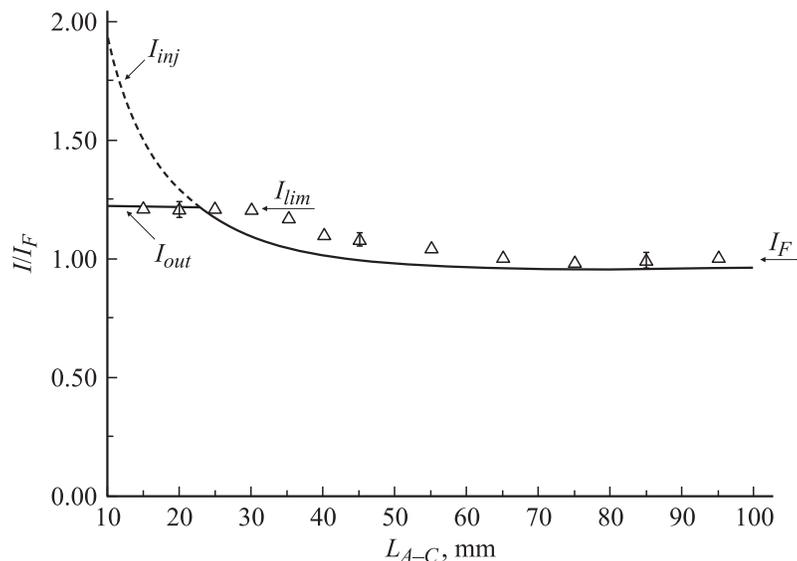


Рис. 3. Зависимость отношения тока пучка к току Федосова от расстояния между катодом и анодной вставкой. Сплошная кривая — результаты моделирования PIC-кодом КАРАТ, пунктирная кривая — расчетное значение инжектируемого тока, точки Δ — результаты экспериментов, проведенных на установке СИНУС-7.

С уменьшением зазора L_{A-C} ток пучка плавно возрастает до предельного

$$I_{lim} = \frac{I_0}{2 \ln(R_C/R_A)} (\Gamma^{2/3} - 1)^{3/2} \quad (2)$$

и после образования виртуального катода остается неизменным.

В эксперименте при образовании виртуального катода на осциллограммах напряжения на катоде и тока пучка появлялись ВЧ осцилляции. Спектр осцилляций был достаточно широким от 1 до 3 GHz. В этом режиме измерялось среднее значение тока пучка. Временной интервал усреднения составлял около 3 ns. Отношение предельного тока к току Федосова, полученное в эксперименте, составило $I_{lim}/I_F \approx 1.23$. Расчетные значения токов для энергии электронов 700 keV и бесконечно

длинной трубы транспортировки составляют $I_{lim} \approx 3.7$ кА, $I_F \approx 2.9$ кА и соответственно $I_{lim}/I_F \approx 1.28$.

Следует отметить, что по результатам численного моделирования виртуальный катод образуется при $L_{A-C}^{cr} \approx 20$ мм, в эксперименте же эта величина составляла $L_{A-C}^{cr} \approx 30$ мм. Такое отличие можно объяснить уменьшением величины зазора в результате движения катодной плазмы вдоль магнитного поля, которое не учитывалось в численном моделировании. Как показывают эксперименты [9], скорость движения границы катодной плазмы при мегавольтовых уровнях напряжения на катоде может достигать $(2-3) \cdot 10^7$ см/с, и в наших экспериментах за время импульса тока эффективный зазор L_{A-C} может уменьшаться на ~ 1 см.

Эксперименты показали, что в трубе транспортировки возможны два состояния электронного пучка: с ВК и без ВК. В состоянии без ВК проходящий ток равен инжектируемому току и плавно меняется от I_F до предельного тока транспортировки I_{lim} , при достижении которого образуется ВК. При дальнейшем увеличении тока проходящий ток примерно равен предельному $I_{out} \approx I_{lim}$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-16527а).

Список литературы

- [1] Ковалев Н.Ф., Фукс М.И. Препринт № 13. Горький: ИПФ, 1980.
- [2] Ковалев Н.Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 7. С. 113–116.
- [3] Дубинов А.Е., Ефимова И.Е. // ЖТФ. 2001. Т. 71 (6). С. 80.
- [4] Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. P. 741.
- [5] Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Коровин С.Д., Рыжов В.В. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 16. С. 16–22.
- [6] Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Сер. Физ. 1996. № 12. С. 21–30.
- [7] Tarakanov V.P. User's Manual for Code Karat. BRA, Springfield, 1992.
- [8] Федосов А.И., Литвинов Е.А., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П. // Изв. вузов. Физика. 1977. № 10. С. 134–135.
- [9] Бугаев С.П., Зайцев Н.И., Ким А.А. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Материалы II Всесоюз. семинара. Горький: ИПФ АН СССР. 1981. С. 36–61.