

10

Экспериментальное измерение скорости движения виртуального катода

© С.Я. Беломытцев, А.А. Гришков, С.А. Кицанов,
И.К. Куркан, С.Д. Полевин, В.В. Рыжов, Р.В. Цыганков

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

Поступило в Редакцию 9 ноября 2007 г.

Исследована транспортировка электронного пучка с виртуальным катодом в двухсекционном канале дрейфа на сильноточном электронном ускорителе СИНУС-7. Впервые экспериментально получена зависимость скорости движения виртуального катода от инжектируемого тока. В канале дрейфа при движении виртуального катода обнаружены СВЧ-колебания, обусловленные переходными процессами при образовании „сжатого“ состояния электронного пучка.

PACS: 41.85.Ja, 29.27.-a

В работе [1] впервые экспериментально на сильноточном электронном ускорителе СИНУС-7 в двухсекционном канале дрейфа был получен плотный пучок электронов с релятивистским фактором ниже релятивистского фактора пучка с предельным током $\gamma_b < \Gamma^{1/3}$, $\gamma_b = 1 + e\varphi_b/mc^2$, где φ_b — разность потенциалов между пучком и катодом, e — заряд электрона, m — масса электрона, c — скорость света в вакууме, Γ — релятивистский фактор, соответствующий полному напряжению на диоде. Такое состояние электронного пучка называется „сжатым“ и характеризуется относительно большой плотностью электронов и низким значением релятивистского фактора.

Сжатый электронный пучок и процессы при его формировании являются малоизученными, но перспективными, например для коллективного ускорения положительных ионов [2,3], и необходимыми для понимания физики процессов транспортировки электронного пучка с виртуальным катодом (ВК), что, в свою очередь, может быть использовано для генерации СВЧ-колебаний на основе ВК [4–6].

Теоретические и численные исследования электронного пучка в сжатом состоянии были проведены в работах [7–11]. Так, в работе [7] показано, что при образовании сжатого состояния электронного пучка в цилиндрическом двухсекционном канале при определенных условиях ВК может смещаться к плоскости инжекции электронов. В работе [8] впервые теоретически найдены скорости движения ВК в зависимости от тока инжекции. В целом, на текущий момент существует теоретический подход [8,10,11], позволяющий рассчитать соотношения токов и релятивистские факторы электронного пучка с ВК в стационарном случае, аналитически определить критические токи, необходимые для образования электронного пучка в сжатом состоянии в двухсекционном канале дрейфа, и рассчитать скорость движения ВК в зависимости от инжектируемого тока.

Целью данной работы являлось экспериментальное измерение скорости движения ВК при транспортировке электронного пучка с ВК.

Экспериментальные исследования проводились на сильноточном электронном ускорителе СИНУС-7 [12] (напряжение на диоде до 2 MV, ток в диоде до 20 kA, длительность импульсов тока — 50 ns). Схема эксперимента (рис. 1) идентична [1], где впервые был экспериментально зафиксирован электронный пучок в сжатом состоянии. Электронный пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией и через анодное сужение инжектировался в двухсекционную трубу дрейфа. Электроны эмитировались со взрывоэмиссионного цилиндрического графитового катода радиусом $R_C \approx 9.5$ mm и толщиной кромки 0.5 mm. Трубчатый пучок электронов формировался в однородном продольном магнитном поле напряженностью ≈ 15 kOe. Радиус и длина анодного сужения (3) составляли 20 и 130 mm соответственно. Длины отрезков двухсекционной трубы дрейфа $L_{dr1} \approx 150$ mm, $L_{dr2} \approx 400$ mm значительно превышали их радиусы $R_{A1} \approx 24$ mm, $R_{A2} \approx 41$ mm. Инжектируемый в трубу дрейфа ток варьировался изменением расстояния между катодом и анодным сужением (L_{AC}), при этом напряжение на диоде поддерживалось постоянным $U \approx -(800 \pm 20)$ kV. Разность потенциалов между электронным пучком и трубой дрейфа измерялась емкостными делителями, установленными в центральной части соответствующих отрезков трубы дрейфа. Измерения тока пучка производились с помощью низкоиндуктивного омического шунта, установленного в цепи коллектора. В секции 1 на расстоянии 40 mm от торцов располагались высокочастотные емкостные датчики, по задержке сигнала между

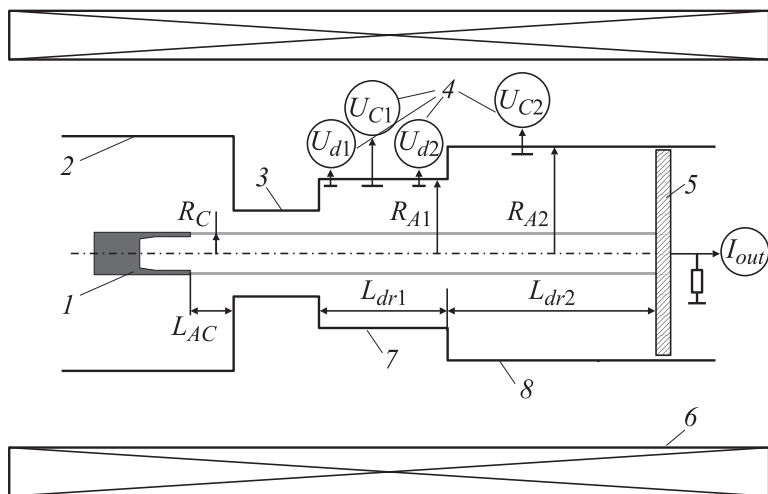


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анодная труба, 3 — анодное сужение, 4 — емкостные делители, 5 — коллектор, 6 — соленоид, 7, 8 — каналы дрейфа малого и большого радиусов.

которыми предполагалось измерять скорость движения ВК. Расстояние между датчиками вдоль оси составляло $L_{12} \approx 70$ mm.

Для измерения тока вакуумного диода I_D была проведена серия экспериментов, в которой коллектор располагался в конце анодного сужения. В этой геометрии при измерении расстояния L_{AC} от 100 mm (катод находится в анодной трубе, рис. 1) до -30 mm (передняя кромка катода углублена на 30 mm в трубу анодного сужения) ток диода изменялся в пределах $I_{FD} < I_D < I_{FA}$, где $I_{FD} \approx 3.1$ kA, $I_{FA} \approx 7.2$ kA — токи Федосова для кромочного диода с магнитной изоляцией в трубах радиуса анодной трубы и анодного сужения соответственно.

В экспериментах по транспортировке электронного пучка в двухсекционной трубе дрейфа, когда коллектор располагался в конце системы (рис. 1), при образовании ВК инжектируемый ток определялся с учетом отраженного тока I_{back} : $I_{inj} = (I_D + I_{out})/2$, где $I_D = (I_{inj} + |I_{back}|)$ — экспериментально измеренное значение тока диода без ВК при данном положении катода L_{AC} .

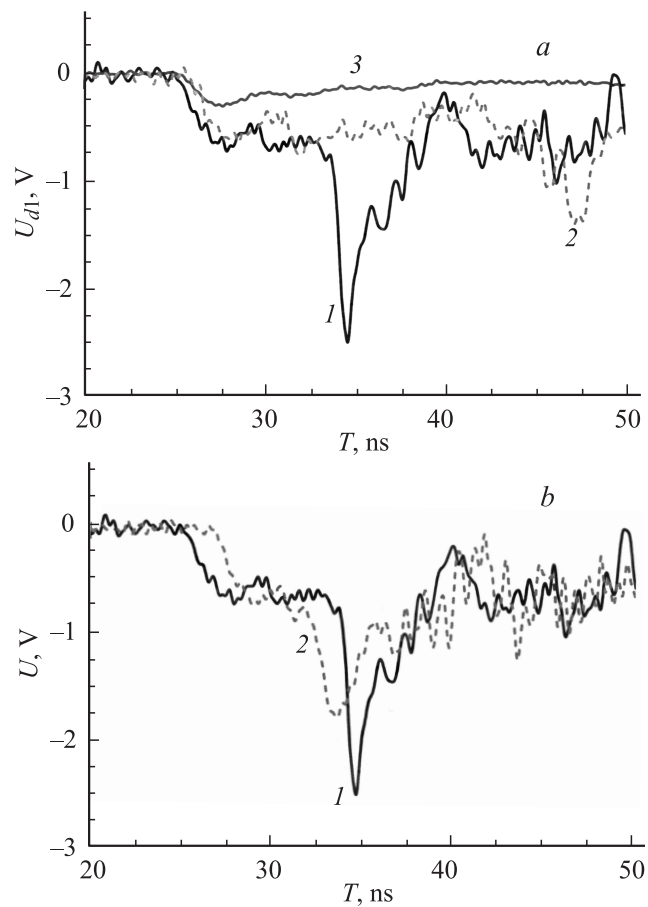


Рис. 2. *a* — типичные осциллограммы сигналов с дифференциальных емкостных датчиков, расположенных в секции 1, при разных зазорах анод-катод: 1 — 10 mm, 2 — 5, 3 — 60 mm; *b* — осциллограммы сигналов с первого (1) и второго (2) дифференциальных емкостных делителей при фиксированном зазоре анод-катод ≈ 10 mm.

На рис. 2, *a* приведены типичные осциллограммы сигналов с высокочастотных емкостных датчиков при разных зазорах анод-катод. Пики на осциллограммах соответствуют моменту возникновения максимума

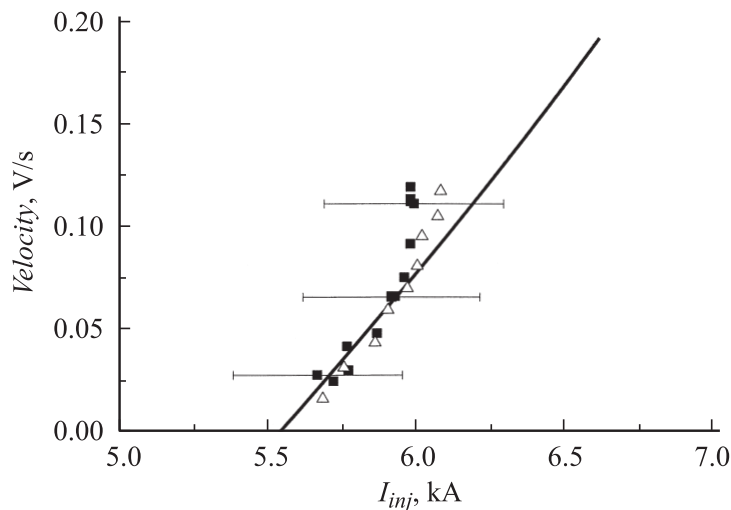


Рис. 3. Зависимость скорости движения ВК от инжектируемого тока. Сплошная кривая — теоретическое решение уравнений транспортировки, ■ — эксперимент, Δ — численное моделирование PIC-кодом KARAT.

потенциала, вызванного появлением ВК вблизи датчика. При зазорах от 5 mm и менее инжектируемый ток превышает значение тока перехода I_{Tr} для первой секции, при этом ВК начинает смещаться к плоскости инжекции; на осциллограммах для этих зазоров мы видим ярко выраженный пик, который соответствует движению ВК. При больших зазорах, следовательно, при меньших токах инжекции ВК не смещается к плоскости инжекции, о чем свидетельствует отсутствие пиков на осциллограммах.

На рис. 2, *b* приведены осциллограммы с высокочастотных емкостных датчиков для фиксированного зазора анод-катод. Возникающее опережение сигнала с первого канала в начальный момент времени соответствует пролету электронного пучка на фронте напряжения; при дальнейшем увеличении тока и достижении им значения тока перехода сигнал со второго датчика опережает сигнал с первого. Средняя скорость движения ВК определялась по времени задержки τ между пиками: $V_{VK} \approx L_{12}/\tau$.

На рис. 3 приведены результаты эксперимента, а также численного решения аналитической системы уравнений транспортировки электронного пучка с движущимся виртуальным катодом и моделирования PIC кодом KARAT [13]. Моделирование показало, что для области значений тока инжекции $I_{inj} \approx 6$ кА ВК образуется на фронте импульса напряжения на диоде. Так же как в [1], это приводит к тому, что низкоэнергетические электроны, отраженные от ВК, не возвращаются на катод и накапливаются в трубе, что приводит к повышению плотности электронов и уменьшению потенциала пучка. Таким образом, эффективный заряд в канале дрейфа становится больше рассчитанного по теоретической модели, что приводит к увеличению скорости движения ВК. Этим, по-видимому, и обусловлено расхождение результатов измерений скорости движения ВК с результатами теоретических расчетов в рассматриваемой области значений I_{inj} . К сожалению, в данной схеме нет возможности измерить скорость движения ВК при распаде сжатого состояния, так как в условиях эксперимента ток инжекции не может меняться без изменений напряжения на диоде. Следует также добавить, что в эксперименте при движении виртуального катода в канале дрейфа были обнаружены СВЧ-колебания (с частотами ~ 1 GHz), обусловленные, как показало численное моделирование, переходными процессами при образовании периодического распределения плотности электронного пучка в сжатом состоянии [14].

В работе [8] теоретически показано, что зависимость скорости движения ВК от величины инжектируемого тока при транспортировке тонкого кольцевого моноэнергетического релятивистского пучка электронов с ВК в цилиндрическом канале дрейфа имеет бифуркационный характер. Отметим, что приведенные результаты по экспериментальному измерению скорости движения ВК хорошо согласуются с нижней частью теоретической зависимости скорости движения ВК от тока инжекции [8].

Таким образом, экспериментально исследована транспортировка электронного пучка с виртуальным катодом в двухсекционном канале дрейфа. Впервые получена экспериментальная зависимость скорости движения виртуального катода от инжектируемого тока.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-08-00494а и 08-02-99041-р_офи) и гранта для молодых ученых СО РАН.

Список литературы

- [1] Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Кицанов С.А., Коровин С.Д., Полевин С.Д., Рыжов В.В., Ячный А.П. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 22. С. 78–81.
- [2] Файнберг Я.Б. // Материалы конференции по ядерно-физическим исследованиям, посвященной 50-летию осуществления в СССР реакции расщепления атомного ядра. М.: ЦНИИ атоминформ, 1983. Ч. 1. С. 222.
- [3] Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные электронные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [4] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // ПриЭ. 1992. Т. 37. № 5. С.385.
- [5] Alyokhin V.V., Dubinov A.E., Selemir V.D. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 945. N 5. P. 945.
- [6] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.
- [7] Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. N 3. P. 741.
- [8] Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Коровин С.Д., Рыжов В.В. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 24. С. 88–94.
- [9] Дубинов А.Е., Ефимова И.Е. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 6. С. 80–86.
- [10] Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Коровин С.Д., Рыжов В.В. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 16. С. 16–22.
- [11] Гришков А.А., Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Рыжов В.В. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 22. С. 46–52.
- [12] Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Сер. Физ. 1996. № 12. С. 21–30.
- [13] Tarakanov V.P. User's Manual for Code Karat. BRA, Springfield, 1992.
- [14] Grishkov A.A., Ryzhov V.V., Belomyttsev S.Ya. // Proc. 14th Symposium on High Current Electronics. 14th SHCE. Tomsk, 2006. P. 42–44. (Изв. вузов. Физика. 2006. № 11. Приложение. С. 42–44).