

10

Экспериментальные исследования электронного пучка в „сжатом“ состоянии

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

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: koro@hcei.tsc.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Поступило в Редакцию 20 июня 2005 г.

Экспериментально исследована транспортировка электронного пучка в двухсекционном канале дрейфа на ускорителе СИНУС-7. Получен плотный пучок электронов с релятивистским фактором γ_b ниже релятивистского фактора пучка с предельным током $\gamma_b < \Gamma^{1/3}$ („сжатое“ состояние электронного пучка).

Известно, что при транспортировке пучка электронов с заданным током I в цилиндрическом канале пучок может находиться как в обычном — „быстром“ состоянии (малая плотность электронов, высокое значение релятивистского фактора $\gamma_b > \Gamma^{1/3}$, где $\Gamma = 1 + eU/mc^2$, e — заряд электрона, m — масса электрона, c — скорость света, U — напряжение на диоде), так и в „медленном“, так называемом „сжатом“ состоянии, которому соответствует высокая плотность электронов и низкие значения $\gamma_b < \Gamma^{1/3}$ [1]. Причем в экспериментах обычно реализовывались пучки в „быстром“ состоянии.

В работе [2] впервые методом численного моделирования показано, что пучок в „сжатом“ состоянии можно получить при его транспортировке в двухсекционном канале дрейфа. В этом случае при превышении током, инжектируемым током I_{inj} , значения предельного тока для канала дрейфа большего радиуса I_{lim2} вблизи стыка труб образуется виртуальный катод (ВК). При дальнейшем увеличении инжектируемого тока и достижении им значения тока перехода I_{Tr} , ВК начинает двигаться к области инжекции, образуя за собой пучок в „сжатом“ состоянии [3]. В то же время „сжатое“ состояние пучка до сих пор не исследовалось экспериментально.

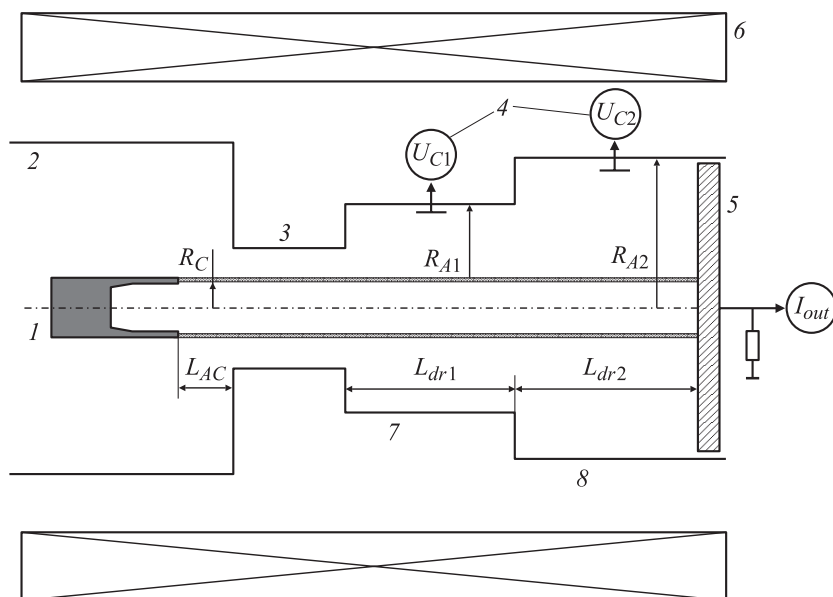


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анодная труба, 3 — анодное сужение, 4 — емкостные делители, 5 — коллектор, 6 — соленоид, 7, 8 — каналы дрейфа малого и большого радиусов.

Целью данной работы являлось проведение экспериментов по формированию электронного пучка в „сжатом“ состоянии при его транспортировке в двухсекционном канале дрейфа, измерению потенциала пучка и тока за ВК. Экспериментальные исследования проводились на сильноточном электронном ускорителе СИНУС-7 [4] (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 вакуумном диоде с магнитной изоляцией и через анодное сужение инжектировался в двухсекционный канал 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 кОе. Радиус и длина анодного сужения составляли 20 и 130 мм соответственно. Длины отрезков двухсекционного канала дрейфа $L_{dr1} \approx 150$ мм, $L_{dr2} \approx 400$ мм значительно превышали их радиусы $R_{A1} \approx 24$ мм, $R_{A2} \approx 41$ мм. Инжектируемый в канал дрейфа ток варьировался изменением расстояния между катодом и анодным сужением (L_{AC}), при этом напряжение на диоде поддерживалось постоянным $U \approx (800 \pm 30)$ кВ. Разность потенциалов между электронным пучком и анодом измерялась емкостными делителями, размещенными в центральной части соответствующих отрезков каналов дрейфа. Измерения тока пучка производились с помощью низкоиндуктивного омического шунта, установленного в цепи коллектора.

Для измерения тока вакуумного диода I_D была проведена серия экспериментов, в которой коллектор располагался в конце анодного сужения. В этой геометрии при изменении расстояния L_{AC} от 70 мм (катод находится в анодной трубе, рис. 1) до -15 мм (передняя кромка катода углублена на 15 мм в трубу анодного сужения) ток диода изменялся в пределах $I_{FD} < I_D < I_{FA}$, где $I_{FD} \approx 3.0$ кА, $I_{FA} \approx 6.8$ кА — токи Федосова для КДМИ (коаксиальный диод с магнитной изоляцией) в каналах дрейфа радиуса анодной трубы и анодного сужения соответственно.

В экспериментах по транспортировке электронного пучка в двухсекционном канале дрейфа, когда коллектор располагался в конце системы (рис. 1), при образовании ВК инжектируемый ток определялся с учетом величины и направления 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} , I_{out} — ток на коллекторе.

Типичные осциллограммы сигналов, полученных с помощью емкостных делителей и шунта, для случаев транспортировки пучка без ВК и при наличии ВК приведены на рис. 2. При больших зазорах L_{AC} , когда $I_D < I_{lim2}$ в отсутствие ВК осциллограммы сигналов имели форму, близкую к трапецевидной (рис. 2, а). Прошедший ток I_{out} в этом случае совпадал с инжектированным током $I_{out} = I_{inj} = I_D$ (отрезок прямой на рис. 3, а). При небольшом превышении тока инжекции значения предельного тока для второго канала дрейфа $I_{inj} > I_{lim2}$, на осциллограмме U_{C2} виден момент времени, после которого значение U_{C2} резко уменьшалось (стрелка на рис. 2, б). Моделирование процесса

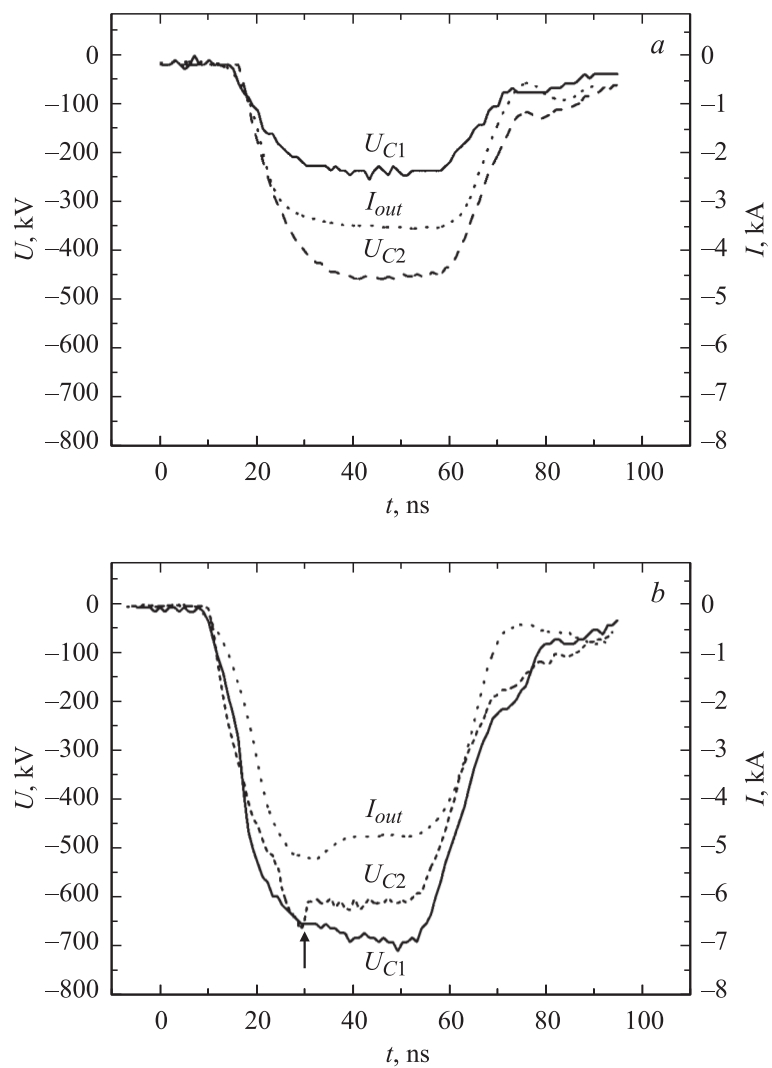


Рис. 2. Типичные осциллограммы потенциалов и тока пучка в двухсекционном канале дрейфа при транспортировке: *a* — без ВК, *b* — с ВК.

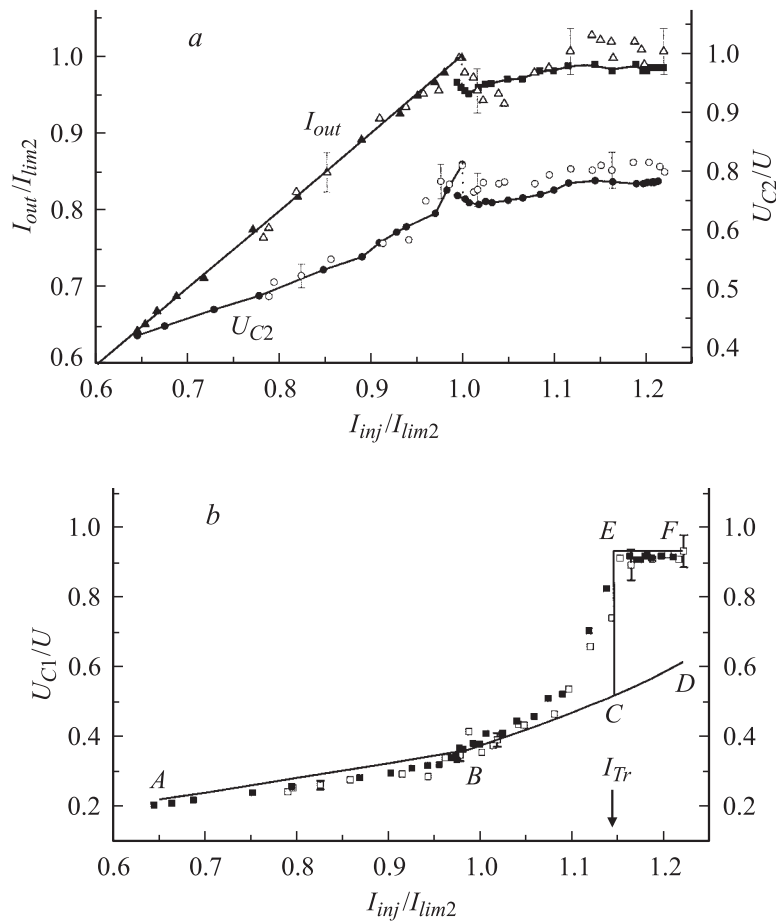


Рис. 3. Потенциалы и ток пучка в двухсекционном канале дрейфа в зависимости от инжектируемого тока. Сплошная кривая и закрашенные символы — результаты моделирования PIC кодом КАРАТ. Точки \square , Δ , \circ — результаты экспериментов, проведенных на ускорителе СИНУС-7. Кривые ABCD и FBCEF — результаты расчетов напряжения U_{C1}/U по двум моделям.

транспортировки пучка в условиях эксперимента с помощью программы КАРАТ [5] показало, что этот момент соответствует времени образования ВК. Поэтому при обработке результатов эксперимента считалось, что значение тока после этого момента времени и спада тока I_{out} соответствует величине тока за ВК.

Как показали результаты экспериментов, а также численное моделирование (рис. 3, *a*) при превышении инжектируемым током значения I_{lim2} значение проходящего тока уменьшается. Причина уменьшения проходящего тока связана с тем, что в момент образования ВК вблизи стыка каналов дрейфа происходит изменение потока z -компоненты импульса электрического поля на фланце стыка. Оценка изменения потока для рассматриваемого случая соответствует уменьшению тока $\Delta I \approx 0.1I_{lim2}$, которое согласуется с экспериментально измеренной величиной. При дальнейшем увеличении инжектируемого тока значение проходящего тока в пределах точности измерений приближается к I_{lim2} . Следует заметить, что в экспериментах по измерению величины тока за ВК в однородном канале дрейфа [6], после образования ВК проходящий ток также уменьшается, однако недостаточная точность измерений и численного моделирования не позволили зарегистрировать этот эффект.

О состоянии электронного пучка в канале транспортировки можно судить по результатам измерений его потенциала. Как видно из рис. 3, *a*, значение потенциала пучка в канале дрейфа большого радиуса U_{C2}/U и его зависимость от инжектируемого тока соответствуют или пучку с предельным током, или пучку в „быстром“ состоянии.

Эксперименты и результаты моделирования показали, что при увеличении тока инжекции потенциал пучка в канале дрейфа меньшего радиуса U_{C1}/U монотонно увеличивается, а затем при достижении током инжекции определенного значения [3] остается постоянным (рис. 3, *b*). Для интерпретации экспериментальных данных на этом же рисунке приведены результаты оценочных расчетов U_C/U по величине заряда пучка в трубе меньшего радиуса для двух случаев. В первом случае предполагалось, что при превышении током инжекции предельного тока I_{lim2} у стыка каналов дрейфа образуется ВК, что приводит к появлению отраженного тока, но пучок находится в „быстром“ состоянии (кривая *ABCD* на рис. 3, *b*). Во втором случае предполагалось, что при достижении током инжекции тока перехода $I_{inj} = I_{Tr}$ [3] ВК из области стыка труб переходит

в начало первой трубы, формируя „сжатое“ состояние электронного пучка (кривая $ABCEF$ на рис. 3, b). Из рисунка видно, что расчеты для второго случая достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными в эксперименте. Следовательно, во всех экспериментах, для которых ток инжекции достигал значения тока перехода $I_{inj} \geq I_{Tr}$ или превышал его, в канале дрейфа меньшего радиуса формировался электронный пучок в однопотоковом „сжатом“ состоянии, потенциал которого, как показали результаты измерений (рис. 3, b), оставался постоянным и не зависел от инжектируемого тока. Причем кинетическая энергия электронов в пучке в „сжатом“ состоянии $mc^2(\gamma_b - 1) \approx (70-80) \text{ keV}$ примерно на порядок меньше, чем их энергия на коллекторе, а релятивистский фактор пучка в этом случае ($\gamma_b = 1.15$) был меньше релятивистского фактора пучка с предельным током ($\Gamma^{1/3} \approx 1.36$).

Отметим, что значение тока перехода, рассчитанное на основе закона сохранения z -компоненты импульса $I_{Tr} = 5.4 \text{ Ка}$ [3], хорошо совпадает с минимальным значением тока инжекции, при котором потенциал пучка становился равным потенциалу пучка в „сжатом“ состоянии.

Моделирование показало, что для области значений тока инжекции $I_{lim2} < I_{inj} < I_{Tr}$, когда ВК находится вблизи стыка каналов дрейфа, в первом канале реализуется двухпотоковое состояние пучка. При этом ВК образуется на фронте импульса напряжения на диоде. Поэтому низкоэнергетические электроны, отраженные от ВК, не возвращаются на катод и накапливаются в канале дрейфа, что приводит к повышению плотности электронов и увеличению потенциальной энергии частиц пучка. Этим, по-видимому, и обусловлено расхождение результатов измерений с результатами оценочных расчетов в рассматриваемой области значений I_{inj} (рис. 3, b , кривая BCE), в которых этот эффект не учитывался.

Таким образом, в работе впервые экспериментально подтверждена возможность формирования электронных пучков в однопотоковом „сжатом“ состоянии, при котором релятивистский фактор электронов пучка меньше релятивистского фактора пучка с предельным током $\gamma < \Gamma^{1/3}$.

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

Список литературы

- [1] *Breizman B.N., Ryutov D.D.* // Nucl. Fusion. 1974. V. 14. P. 873.
- [2] *Ignatov A.M., Tarakanov V.P.* // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. P. 741.
- [3] *Гришков А.А., Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Рыжов В.В.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 22. С. 46–52.
- [4] *Коровин С.Д., Ростов В.В.* // Изв. вузов. Сер. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.
- [5] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code Karat. BRA, Springfield, 1992.
- [6] *Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Кицанов С.А., Коровин С.Д., Полевин С.Д., Рыжов В.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 2. С. 22–26.