

10

Экспериментальное исследование распада сжатого состояния электронного пучка

© 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: tsygankov@ife.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2010 г.

Экспериментально на сильноточном электронном ускорителе исследована динамика распада сжатого состояния электронного пучка в двухсекционном канале дрейфа. На основе результатов численного моделирования предложен и реализован метод частичного перехвата инжектируемого тока в течение импульса, позволяющий обеспечить необходимые условия для распада сжатого состояния. Скорость движения виртуального катода при распаде сжатого состояния составляет 6–8% от скорости света в вакууме. Экспериментальные результаты качественно согласуются с аналитическими оценками и численным моделированием.

В 2005 году 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 [1]. Такое состояние электронного пучка называется сжатым и характеризуется относительно большой плотностью электронов и низким значением релятивистского фактора. Этот эксперимент подтвердил основные выводы разработанной ранее на основе законов сохранения потока z -компоненты импульса поля и частиц теории транспортировки электронного пучка с виртуальным катодом (ВК) в секционных каналах дрейфа [2–4].

Изучение процесса движения виртуального катода при образовании и распаде сжатого состояния необходимо для разработки практических схем с возможностью управления движением ВК, что может найти широкое применение в области генерации СВЧ-излучения. В то же время численное моделирование процесса транспортировки электрон-

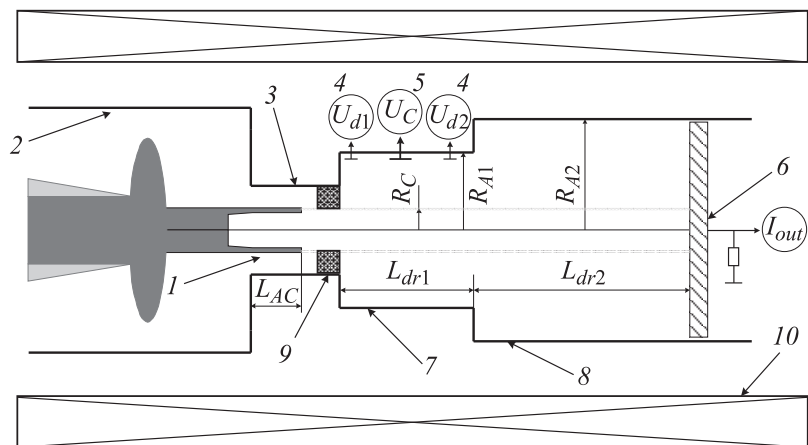


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — анодная труба, 3 — анодное сужение, 4 — высокочастотные датчики, 5 — емкостной делитель, 6 — коллектор, 7, 8 — каналы дрейфа малого и большого радиусов, 9 — анодная диафрагма, 10 — соленоид магнитного поля.

ного пучка в сжатом состоянии в секционном канале дрейфа показало, что физические эффекты при распаде сжатого состояния могут быть использованы для получения быстрых пучков тяжелых частиц и коллективного ускорения ионов в системах с движущимся ВК [5,6]. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование динамики распада сжатого состояния электронного пучка и измерение скорости движения ВК.

Экспериментальные исследования проводились на сильноточном электронном ускорителе СИНУС-7 [7] (напряжение на катоде до 2 МВ, ток в диоде до 20 кА, длительность импульса тока на полувывоте 50 нс). Схема эксперимента (рис. 1) аналогична используемой ранее в работах [1,8], где было зарегистрировано сжатое состояние электронного пучка, а также измерены скорости движения ВК при образовании сжатого состояния.

Теоретический анализ возможных условий транспортировки электронного пучка с ВК в двухсекционном канале дрейфа и проведенное компьютерное моделирование с использованием PIC кода KARAT [9]

показали, что существуют и могут быть реализованы условия, в которых возможен распад сжатого состояния электронного пучка, происходящий путем смещения ВК через канал меньшего радиуса к плоскости соединений секций. При формировании и распаде сжатого состояния электронного пучка основным критерием является отношение инжектируемого тока к току перехода I_{tr} . В случае, когда инжектируемый ток превышает I_{tr} , в первой секции канала дрейфа образуется сжатое состояние электронного пучка, если же ток инжекции становится меньше I_{tr} , сжатое состояние распадается [4]. Для того чтобы после образования сжатого состояния уменьшить ток, поступающий в область виртуального катода, не меняя импеданс диода, был предложен и реализован метод частичного перехвата инжектируемого тока в течение импульса. В диодный узел помещалась кольцевая анодная диафрагма, радиус которой незначительно превышал радиус катода (9 на рис. 1). На диафрагму при определенной форме импульса напряжения за счет увеличения в течение импульса ларморовского радиуса электронов должен осуществляться перехват части инжектируемого в канал дрейфа тока. С помощью численного моделирования были проведены расчеты оптимальных величин внешнего магнитного поля, формы и амплитуды импульса напряжения. Для формирования импульса необходимой формы в экспериментах была использована неоднородная передающая линия со скачкообразным изменением волнового сопротивления. Форма импульса рассчитывалась с использованием SPICE моделирования. Оптимальные волновые сопротивления и длины участков линии составили соответственно: $\rho_1 \approx 40 \Omega$, $L_1 \approx 1$ м; $\rho_2 \approx 14 \Omega$, $L_2 \approx 3$ м; $\rho_3 \approx 40 \Omega$, $L_3 \approx 1$ м. Типичная форма импульса напряжения на катоде с неоднородной передающей линией приведена на рис. 2.

В эксперименте электронный пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией и через анодное сужение 3 с диафрагмой 9 инжектировался в двухсекционный канал дрейфа. Электроны эмитировались со взрывоэмиссионного цилиндрического графитового катода радиусом $R_C \approx 9.5$ мм и толщиной кромки 0.5 мм. Трубочатый пучок электронов формировался в области однородного продольного магнитного поля. Радиус и длина анодного сужения составляли 20 и 130 мм, радиус и длина диафрагмы — 11.2 и 25 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. Ток в диоде мог варьироваться

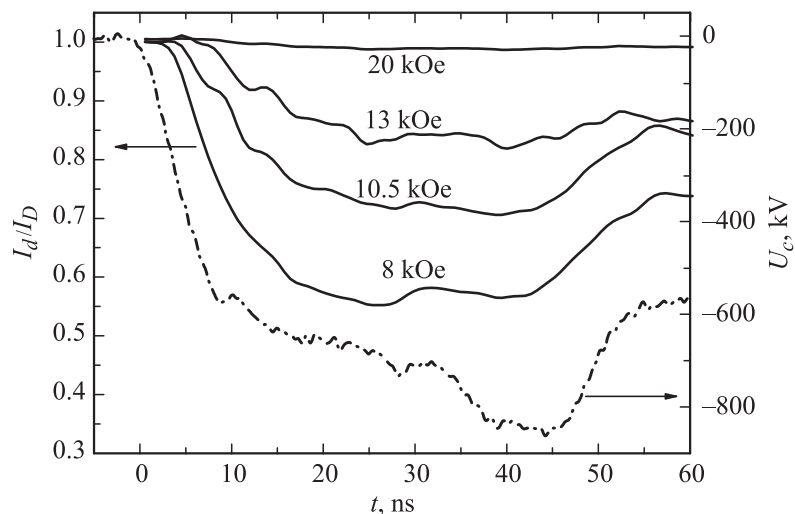


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на катоде U_c и отношение тока I_d за диафрагмой к полному току пучка перед диафрагмой I_D , измеренные в отсутствие ВК при различных продольных магнитных полях в случае, когда коллектор располагался в конце анодного сужения.

изменением расстояния между катодом и анодным сужением (L_{AC}). Измерение тока пучка производилось с помощью омического шунта, установленного в цепи коллектора. В первой секции на расстоянии 40 мм от торцов располагались высокочастотные дифференцирующие емкостные датчики 4, по задержке сигнала (τ) между которыми определялась средняя скорость движения ВК: $\bar{V}_{VC} \approx L/\tau$. Расстояние между датчиками вдоль оси $L \approx 70$ мм. Разность потенциалов между электронным пучком и анодом в первой секции измерялась емкостным делителем 5, установленным в середине канала дрейфа (равноудалено от торцов).

На первом этапе была проведена серия измерений для определения тока инжекции и оптимальных режимов токопрохождения, в которых можно было бы перехватить достаточную часть инжектируемого тока для обеспечения условий распада сжатого состояния. В данных экспериментах коллектор располагался в конце анодного сужения

за диафрагмой, зазор между кромкой катода и анодным сужением составлял $L_{AC} \approx -20$ mm (кромка катода углублена в анодное сужение). На рис. 2 представлены осциллограмма напряжения на катоде и экспериментальные кривые отношения прошедшего тока I_d к полному току пучка перед диафрагмой I_D , измеренные в отсутствие виртуального катода при различных магнитных полях. Кривые свидетельствовали о том, что при большом магнитном поле (20 kOe) практически весь ток проходит за диафрагму и равен току Федосова для коаксиального диода с магнитной изоляцией в канале радиуса анодного сужения: $I_d = I_{FA} \approx 7.2$ kA. По мере уменьшения величины магнитного поля доля тока, который перехватывается на диафрагму, увеличивается и достигает 40% для магнитного поля около 8 kOe. Численное моделирование и аналитические оценки показали, что оптимальными параметрами для данной геометрии диода и импульса напряжения являются магнитные поля $H_{opt} \approx 10-11$ kOe, при которых перехватывается около 20–25% инжектируемого тока.

На рис. 3 представлены осциллограмма напряжения на катоде, рассчитанный аналитически из реальной осциллограммы напряжения ток перехода I_{tr} и инжектируемый ток $I_{inj} = (I_d + I_{out})/2$. В последнем выражении $I_d = (I_{inj} + |I_{back}|)$ — это экспериментально измеренное значение тока за диафрагмой в отсутствие ВК. При образовании ВК инжектируемый ток определялся с учетом отраженного тока J_{back} и тока I_{out} , прошедшего за ВК. На фронте импульса напряжения за счет того, что в систему инжектируется ток, превышающий ток перехода I_{tr} , ВК смещается к плоскости инжекции пучка, формируя за собой сжатое однопотоковое состояние [1,4]. Из рис. 2 следует, что при магнитном поле $H_{opt} \approx 10.5$ kOe на уровне напряжения более 600 kV на дополнительную анодную вставку начинает перехватываться более 20% инжектируемого тока. Этому моменту на рис. 3 соответствует начало расхождения кривых I_{inj} и I_{tr} , свидетельствующее о том, что ток инжекции в канал транспортировки становится меньше тока перехода, следовательно, должен происходить распад сжатого состояния.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы с высокочастотных датчиков и емкостного делителя при напряженности продольного магнитного поля $H \approx 10.5$ kOe и напряжении на катоде в максимуме около 850 kV. Пики отрицательной полярности на осциллограммах с высокочастотных датчиков соответствуют смещению ВК в сторону инжекции пучка и образованию сжатого состояния. Как видно из

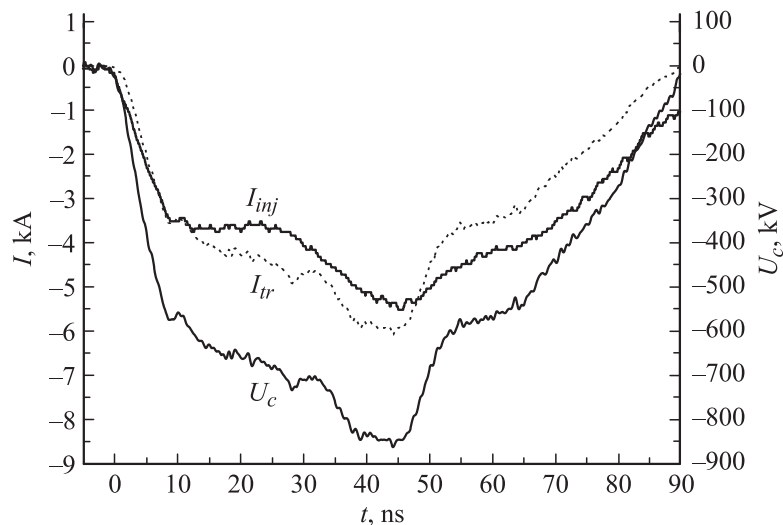


Рис. 3. Типичные осциллограммы напряжения на катоде (U_c), инжектируемого тока (I_{inj}) и тока перехода (I_{tr}), вычисленного аналитически по осциллограмме напряжения.

осциллограммы с емкостного делителя, после образования сжатого состояния потенциал пучка возрастает почти до 500 kV. Движению же ВК в сторону коллектора (вправо на рис. 1) при распаде сжатого состояния соответствуют пики положительной полярности. При этом потенциал пучка уменьшается примерно до 300 kV. Скорость движения ВК определялась по времени задержки между пиками. На приведенных осциллограммах задержка в сигналах с датчиков соответствует скорости движения ВК при распаде сжатого состояния около 8% от скорости света в вакууме. Следует отметить, что в большом магнитном поле (около 20 kOe) при отсутствии перехвата тока в течение импульса напряжения пиков положительной полярности не наблюдалось и, следовательно, распада сжатого состояния не происходило.

Как показывают аналитические оценки и численное моделирование, скорость движения ВК при распаде сжатого состояния зависит от отношения токов I_{inj}/I_{tr} и энергии инжектируемых в канал дрейфа электронов. В эксперименте при изменении напряжения на катоде

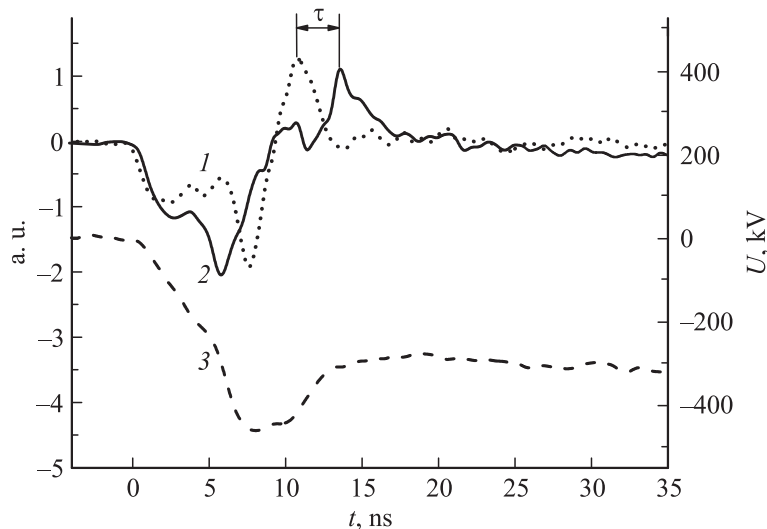


Рис. 4. Типичные осциллограммы сигналов с первого (1) и второго (2) высокочастотных датчиков и емкостного делителя напряжения (3), $H_{opt} \approx 10.5 \text{ kOe}$, $U_c^{max} \approx 850 \text{ kV}$.

в диапазоне $U_c^{max} \approx 650\text{--}1000 \text{ kV}$ и оптимальной величины продольного магнитного поля $H_{opt} \approx 9\text{--}11 \text{ kOe}$, при которой обеспечивался 20–25%-ный перехват тока в диоде, скорость движения ВК при распаде сжатого состояния изменялась в пределах 6–8% от скорости света в вакууме. К сожалению, схема эксперимента оказалась чувствительной к изменению параметров транспортировки электронного пучка. Так, при фиксации, например, величины магнитного поля не удастся стабилизировать во времени момент распада сжатого состояния, распад сжатого состояния происходит на различных участках импульса напряжения. В ряде экспериментов на осциллограммах с высокочастотных датчиков наблюдались повторные пики, соответствующие образованию сжатого состояния. Из осциллограмм на рис. 3 видно, что на спаде импульса напряжения возможно повторное образование сжатого состояния. Это объясняется тем, что при уменьшении напряжения падает эффективность перехвата тока и вновь реализуются условия, при которых

формируется сжатое состояние. В режимах, когда инжектируемый ток незначительно превышал ток перехода, наблюдались сильные осцилляции на сигналах с высокочастотных датчиков, которые сложно однозначно интерпретировать. Такие периодические режимы в данной работе не рассматривались, но представляют определенный интерес для дальнейшего исследования и развития понимания физики процесса распада сжатого состояния и его практических применений.

Скорости движения ВК при распаде сжатого состояния оказались на 30–50% меньше, чем при образовании сжатого состояния [8,10]. Это может быть объяснено тем, что разница между инжектируемым током и током перехода в случае образования сжатого состояния была больше, чем в случае его распада (в случае образования сжатого состояния инжектируется фактически ток Федосова для канала радиуса анодного сужения, который существенно превышает ток перехода).

Таким образом, в работе экспериментально исследована на сильно-точном электронном ускорителе СИНУС-7 динамика распада сжатого состояния электронного пучка в двухсекционном канале дрейфа, характеризующая движением ВК в направлении коллектора. Предложен и реализован метод частичного перехвата инжектируемого тока в течение импульса, позволяющий обеспечить необходимые условия для распада сжатого состояния. Измеренные скорости движения ВК при распаде сжатого состояния достигали 8% от скорости света в вакууме. Экспериментальные результаты качественно согласуются с аналитическими оценками и численным моделированием.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-08-01653а).

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. 74–81.
- [2] Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. N 3. P. 741.
- [3] Гришков А.А., Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Рыжов В.В. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 16. С. 16–22.
- [4] Гришков А.А., Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Рыжов В.В. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 22. С. 46–52.

- [5] *Файнберг Я.Б.* // Коллективные методы ускорения: Материалы конф. по ядер-физ. исслед., посвящ. 50-летию осуществления в СССР реакции расщепления атомного ядра. М.: ЦНИИ атоминформ, 1983. Ч. 1. С. 222.
- [6] *Grishkov A.A., Belomyttsev S.Ya., Ryzhov V.V.* // Ion acceleration by moving virtual cathode during the electron beam „compressed“ state collapse. Proc. 15th Symposium on High Current Electronics. 15th SHCE. Tomsk, 2008. P. 172.
- [7] *Коровин С.Д., Ростов В.В.* // Изв. вузов. Сер. Физ. 1996. № 12. С. 21–30.
- [8] *Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Кицанов С.А., Куркан И.К., Полевин С.Д., Рыжов В.В., Цыганков Р.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 13. С. 8–14.
- [9] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code Karat. BRA, Springfield, 1992.
- [10] *Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Коровин С.Д., Рыжов В.В.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 24. С. 88–94.