

10;12

О транспортировке сильноточного релятивистского электронного пучка в трубе дрейфа в отсутствие внешнего магнитного поля

© С.А. Кицанов, В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов

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

Поступило в Редакцию 4 июня 2008 г.

Проведены коллекторные измерения тока сплошного сильноточного электронного пучка, эмитируемого с металлодиэлектрического лезвийного катода в отсутствие внешнего магнитного поля и проходящего через анодную сетку в область гладкой трубы дрейфа. В эксперименте достигнута транспортировка электронного потока на расстояния, 2 раза превышающие диаметр трубы дрейфа. Найдена оптимальная конфигурация катода и охранного электрода, позволившая повысить эффективность релятивистского черенковского СВЧ-генератора без магнитного поля до 10% при импульсной мощности генерации 1.3 GW на частоте 4.03 GHz.

PACS: 84.40.Fe

Возможность транспортировки сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП), формируемого в осесимметричном планарном диоде в отсутствие внешнего магнитного поля, в гладкой трубе дрейфа была ранее теоретически показана в работе [1]. В ней констатировалось, что за счет воздействия со стороны собственного азимутального поля, препятствующего быстрому разлету частиц и доминирующего вблизи анодной сетки в силу граничных условий, длина транспортировки пучка может достигать значений $L_{TR} \approx R_A \gamma^2 = R_B \gamma^2$, где γ — релятивистский фактор, R_A , R_B — радиус трубы дрейфа и внешний радиус пучка соответственно. В этой же работе был представлен новый вариант релятивистского СВЧ-генератора — черенковский СВЧ-генератор без внешнего магнитного поля [1,2]. Были приведены результаты численного моделирования,

которые показали, что эффективность данного прибора может достигать 30% при гигаваттном уровне выходной микроволновой мощности. Высокий расчетный КПД генератора достигается за счет длительного взаимодействия [3] РЭП и синхронной электромагнитной волны, имеющей фазовую скорость, близкую к скорости света. Однако в условиях реального эксперимента эффективность преобразования мощности не превышала 8%, а по прошедшему через анодную сетку току 13%, что значительно ниже расчетного значения. Поэтому была необходима экспериментальная проверка эффективности транспортировки сильноточного РЭП в отсутствие внешнего магнитного поля.

Эксперименты были выполнены с использованием импульсно-периодического наносекундного ускорителя электронов „СИНУС-7“ [4], который генерировал в режиме одиночных импульсов в плоском диоде электронный пучок с током $12 \div 15$ кА, длительностью около 50 ns при напряжении в диоде ≈ 1.2 МВ. Для эмиссии электронов в экспериментах использовались различные конфигурации металлодиэлектрических лезвийных катодов на основе композиции медь–стеклотекстолит. Катоды были образованы структурой периодически расположенных прямых пластин или кольцевых композитных лезвий, помещенных внутрь фокусирующего (охранного) электрода из нержавеющей стали. Также варьировалась конфигурация охранных электродов и выполнялась электрохимическая полировка их поверхностей для снижения вероятности взрывной эмиссии с фокусирующего электрода за время длительности импульса напряжения. Анодная сетка изготавливалась из стальной нержавеющей проволоки диаметром 0.2 mm, с ячейкой в форме квадрата и размером 8×8 mm.

Были выполнены коллекторные измерения (рис. 1, *a*) тока пучка $I(L)$, прошедшего за анодную сетку в область трубы дрейфа диаметром 100 mm, для различных значений зазора анод-катод Z_{C-A} (рис. 1, *b*). Исследования проводились для наиболее интересной с точки зрения применения в черенковском СВЧ-генераторе без магнитного поля области значений прошедшего тока 6–10 кА и энергии электронов ≈ 1.2 MeV. Была использована конфигурация катодного узла из микроволнового эксперимента [2] (внешний диаметр охранного электрода 80 mm, $h \approx 3$ mm, $R \approx 65$ mm). Из полученных зависимостей видно, что с увеличением зазора анод-катод происходило увеличение длины транспортировки электронного пучка в трубе дрейфа. При этом полный

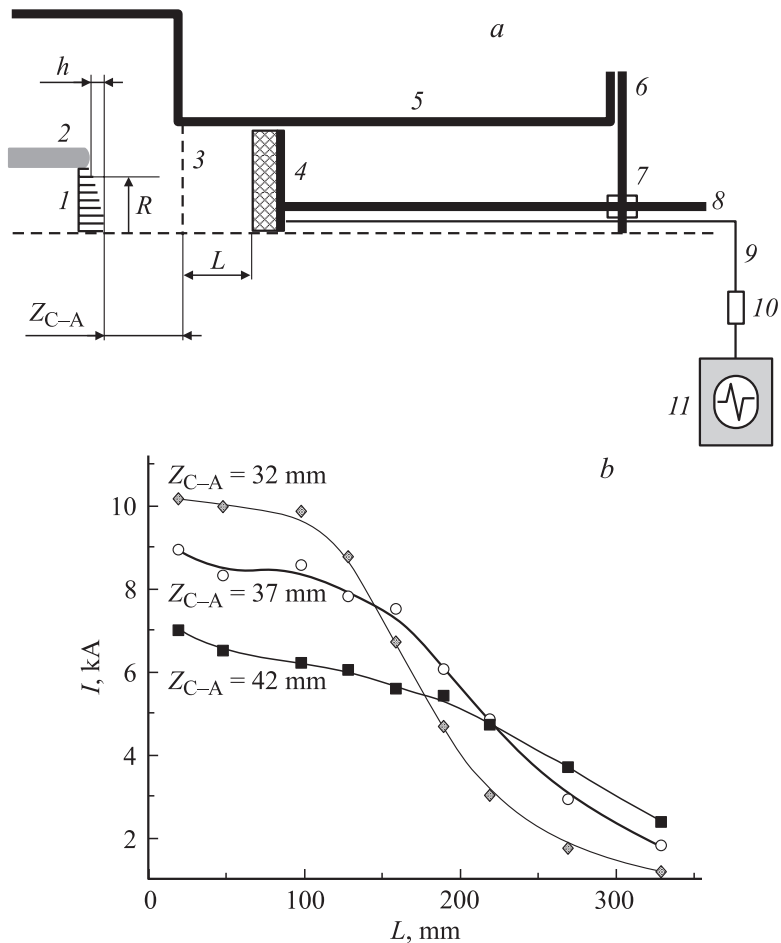


Рис. 1. *a* — схема измерений тока СРЭП в пространстве дрейфа: 1 — лезвийный катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анод в виде сетки, 4 — передвижной графитовый коллектор с токовым шунтом, 5 — труба дрейфа, 6 — торцевой фланец, 7 — вакуумное уплотнение, 8 — поршень для перемещения шунта, 9 — сигнальный кабель, 10 — делитель, 11 — осциллограф TDS 754С; *b* — зависимости прошедшего тока пучка I от расстояния между коллектором и анодной сеткой L для различных зазоров между катодом и сеткой Z_{C-A} .

ток диода падал от 14.5 до 11.7 кА, а прошедший за анодную сетку ток пучка $I(L \approx 0)$ уменьшался с 10 до 7 кА. Таким образом, отношение прошедшего тока пучка к полному току диода уменьшалось с 0.7 до 0.6, т. е. возрастали потери тока в области планарного диода.

Для измерения радиального распределения тока электронного пучка был разработан передвижной датчик, состоящий из 5 отдельных графитовых коллекторов с токовыми шунтами (рис. 2, *a*), которые располагались на различных расстояниях от центра датчика. Площадь каждого коллектора составляла 50 mm^2 . На рис. 2, *b* представлены амплитуды токов с 5 шунтов, измеренные на различных расстояниях между датчиком и анодной сеткой (L) при фиксированном зазоре $Z_{C-A} = 37 \text{ mm}$.

При фиксированном зазоре $Z_{C-A} = 37 \text{ mm}$ были проведены коллекторные измерения (рис. 1, *a*) прошедшего тока пучка для нескольких вариантов катодов (рис. 3) и размеров ячейки анодной сетки. Эксперименты показали, что увеличение выпуклости катода h приводит к некоторому увеличению доли электронного пучка, прошедшего на расстояние порядка $2 \div 3$ диаметров трубы дрейфа ($L \approx 200 \div 300 \text{ mm}$). Однако при этом отношение прошедшего за анодную сетку тока пучка $I(L \approx 0)$ к полному току диода уменьшалось с 0.8 до 0.6 (возрастали потери тока в области планарного диода). Вариации внешнего диаметра охранного электрода (80, 95 mm) и размера стороны ячейки (4, 8, 12 mm), а также замена в катоде прямых лезвий на кольцевые не привели к существенному изменению условий транспортировки.

В целом данные эксперименты показали заниженные значения длины транспортировки сплошного цилиндрического пучка в трубе дрейфа по отношению к аналитическим и численным оценкам. Наблюдаемое отличие может быть связано с рядом особенностей эксперимента, к числу которых можно отнести: паразитную эмиссию электронов с поверхности охранного электрода, непостоянство импеданса вакуумного диода в течение импульса ускоряющего напряжения ускорителя, конечный размер ячейки анодной сетки. Отметим, что в экспериментах не применялись анодные сетки с размером ячейки менее 4 mm. Это связано с тем, что в первых экспериментах с релятивистским черенковским СВЧ-генератором было замечено, что уменьшение размера ячейки анодной сетки приводило сначала к снижению импульсной микроволновой мощности, затем к значительной дестабилизации от импульса к импульсу и срыву генерации. По-видимому, этот факт

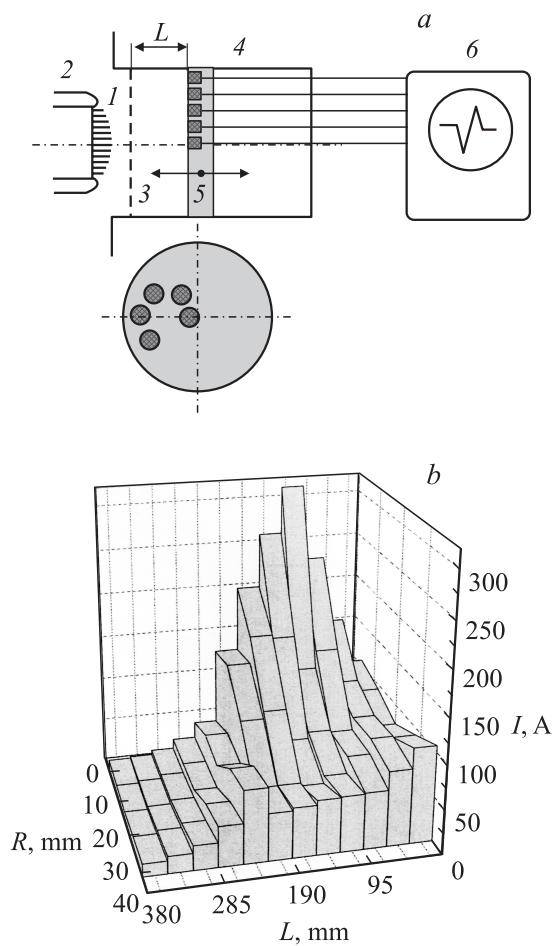


Рис. 2. *a* — схематический рисунок токового шунта и схемы измерения: 1 — лезвийный катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анодная сетка, 4 — труба дрейфа, 5 — передвижной датчик, 6 — осциллограф; *b* — поперечное распределение тока пучка на различных расстояниях от анодной сетки (сжатие пучка собственным магнитным полем происходит на расстоянии $L \approx 100$ mm от анодной сетки).

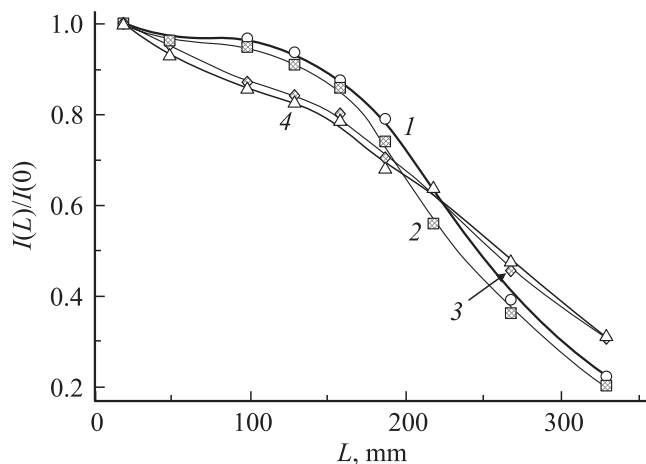


Рис. 3. Нормированные на максимальные значения $I(L \approx)$ продольные распределения прошедшего тока пучка $I(L)$ для различных катодов при $R \approx 65$ мм: 1 — катод с прямыми лезвиями $h \approx 3$ мм; 2 — катод с прямыми лезвиями $h \approx 1$ мм; 3 — катод с прямыми лезвиями $h \approx 7$ мм; 4 — катод с цилиндрическими лезвиями $h \approx 7$ мм.

можно связать с тем, что сетка участвует в селекции колебаний в электродинамической системе и дискриминирует высокочастотные колебания, понижая их добротность.

Результаты экспериментов были использованы для повышения эффективности релятивистского черенковского СВЧ-генератора без внешнего магнитного поля. Поскольку присутствие мощного ВЧ-поля электромагнитной волны может приводить к изменению условий транспортировки пучка, а также учитывая необходимость выполнения условий для селекции колебаний, проводилась дополнительная оптимизация катодного узла. В конечном итоге выбор профиля катода с $h \approx 4$ мм, зазора анод-катод $Z_{C-A} = 35$ мм, а также размера ячейки сетки 12 мм позволили повысить пиковую мощность генерации до 1.3 ± 0.3 GW и эффективность прибора по полному току пучка до $10 \pm 2\%$ при стандартном отклонении пиковых значений микроволновой мощности около 13% (серия из 20 импульсов). Длительность микроволновых импульсов в среднем была около 11 ns на частоте генерации 4.03 GHz,

а энергия, измеренная апертурным калориметром, 13 ± 1 J. В серии импульсов наблюдались режимы, когда пиковая мощность генерации достигала 1.6 ± 0.3 GW при эффективности прибора $12 \pm 2\%$. Если при расчете эффективности генератора учитывать только прошедший ток, то КПД прибора составляет 15%, а в ряде режимов около 20%, что близко к расчетному значению 30%.

Таким образом, эксперименты в целом подтвердили результаты проведенного ранее аналитического рассмотрения условий транспортировки сплошного цилиндрического электронного пучка на расстояния, превышающие диаметр трубы дрейфа в отсутствие внешнего фокусирующего магнитного поля [1]. Соответствующий выбор геометрии катода, фокусирующего электрода и размера ячейки анодной сетки позволили повысить мощность СВЧ-излучения релятивистского черенковского СВЧ-генератора без внешнего магнитного поля при неизменной конфигурации его электродинамической системы до 1.3 GW и КПД до 10%.

Авторы выражают благодарность П.В. Выходцеву за помощь в проведении калориметрических измерений.

Список литературы

- [1] *Климов А.И., Коровин С.Д., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 829–836.*
- [2] *Климов А.И., Коровин С.Д., Ростов В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 3. С. 55–61.*
- [3] *Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. // Вестник АН СССР. 1979. № 4. С. 11–23.*
- [4] *Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.*