

10

Релятивистская лампа обратной волны с многоструйным электронным пучком

© М.Б. Гойхман, А.В. Громов, В.В. Кладухин, С.В. Кладухин,
Н.Ф. Ковалев, С.П. Храмцов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: khramtsov@ier.uran.ru

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В окончательной редакции 14 октября 2010 г.

Изложены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния многоструйности кольцевых электронных пучков на работу сильноточной релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ). Формирование многоструйных электронных пучков осуществлялось с помощью взрывоэмиссионных катодов, выполненных в виде графитовых трубок с гребенчатой кромкой. Отмечается высокая толерантность рабочих характеристик ЛОВ к многоструйности электронных пучков. Указываются потенциальные возможности использования многоструйных электронных пучков в конструкциях ЛОВ.

Использование в релятивистских лампах обратной волны (ЛОВ) многоструйных сильноточных электронных пучков, получаемых с помощью взрывоэмиссионных катодов, с обособленными эмиссионными центрами, способствует сохранению поперечного сечения электронного пучка во времени, что может быть использовано для увеличения длительности и частоты следования импульсов выходного излучения [1]. Разбиение электронного пучка на отдельные струи создает предпосылки заключения их в отдельные каналы транспортировки, как это делается в многолучевых приборах слаборелятивистской электроники [2], что позволяет увеличить предельный ток и соответственно улучшить многие из рабочих характеристик ЛОВ.

Влияние струйности электронных пучков на работу сильноточных релятивистских ЛОВ проверялось на макете ЛОВ трехсантиметрового диапазона длин волн с короткой гофрированной системой и резонансным рефлектором-модулятором [3] (рис. 1, а), при этом были использованы прямоугольная гофрировка и двухэлектродная коаксиальная пушка с магнитной изоляцией катода. Эмитирующие кромки

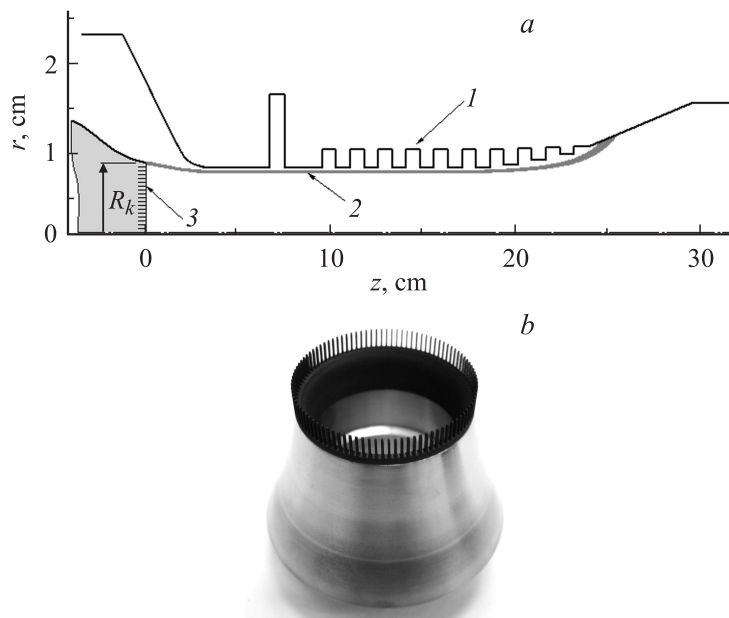


Рис. 1. *a* — конструктивная схема ЛОВ: 1 — электродинамическая система, 2 — электронный пучок, 3 — катод; *b* — многостержневой кромочный катод K_2 .

катодов были выполнены из графита, обособленность эмиссионных центров достигалась использованием тонких игольчатых стержней, равномерно распределенных по окружности. Катоды устанавливались в металлический катододержатель, обеспечивающий уменьшение тока обратного электронного пучка. В экспериментах использовались 4 типа катодов: K_1 — со сплошной кромкой, K_2 — из 100 обособленных стержней, K_3 — из 32 стержней, K_4 — из 16 стержней. Тонкие эмитирующие стержни, расположенные в один ряд по окружности, изготавливались путем фрезерования пазов в кольцевой кромке графитового цилиндра (рис. 1, *b*). У всех катодов стержни были одинаковыми — длина 5 мм и сечение 0.5×0.5 мм. Одинаковыми были и диаметры цилиндров ($\varnothing_k = 2R_k$), из которых они изготавливались ($\varnothing_k = 34$ мм). Такого же диаметра ($\varnothing_k = 34$ мм) была и кромка сплошного катода

(K_1), который использовался в роли тестового или базового варианта. Катоды устанавливались в слабосходящемся направляющем магнитном поле (H_0), с чем связана небольшая компрессия электронного пучка, т.е. диаметр тонкого трубчатого пучка в пространстве взаимодействия ЛОВ уменьшался до $\varnothing_b = 26$ mm. При этом минимальный зазор между пучком и стенкой гофрированной системы был около 1 mm.

В процессе экспериментов регистрировались осциллограммы импульсов:

- с емкостного делителя, установленного в области катододержателя,
- с пояса Роговского, установленного там же,
- с СВЧ-детектора, установленного неподвижно в промежуточной дифракционной зоне рупорного излучателя.

Структура электронного пучка и его поперечные размеры определялись по следу на торцевых мишенях, выполненных из медных и капролоновых пластин. При анализе результатов экспериментов учитывались отражения электронов от мишеней и явления удвоения числа струй в пространстве взаимодействия ЛОВ.

На регулярном участке гофрированной системы магнитное поле (H_0) было однородным, а его максимальное значение выбиралось в диапазоне от 15 до 30 кОе. Длительность импульсов магнитного поля составляла 15 ns. Амплитуда импульса ускоряющего напряжения не изменялась и во всех экспериментах поддерживалась на уровне 450 кV.

При амплитуде магнитного поля $H_0 \approx 30$ кОе ток электронного пучка со сплошного кромочного катода (K_1) был равен 8 кА, при этом мощность выходного излучения ЛОВ составляла около 1 GW. Осциллограммы, соответствующие этому режиму, приведены на рис. 2, а. При использовании катодов (K_2, K_3, K_4) амплитуда и форма импульсов тока и напряжения оказались даже в деталях близкими к представленным на рис. 2, а. Следовательно, токи парциальных электронных пучков, как и полный ток, ограничены не эмиссионной способностью стержней, а общим пространственным зарядом вакуумного электронного пучка. Соответственно величина тока с каждого стержня обратно пропорциональна общему числу стержней (N). Согласно следам на мишенях, полученным при $H_0 = 30$ кОе, электронный пучок с катода K_4 разбивается на отдельные струи (рис. 3, 1) с поперечными размерами

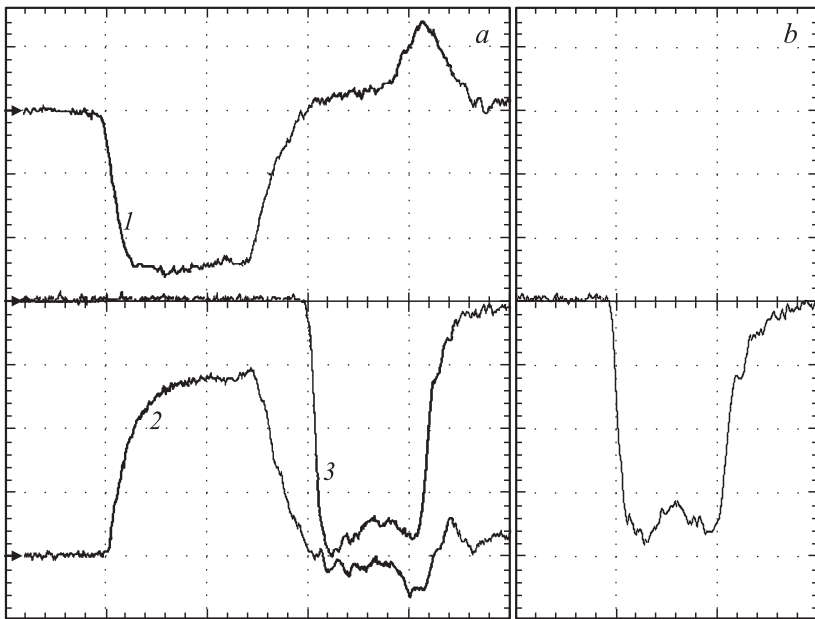


Рис. 2. *a* — осциллограммы импульсов для ЛОВ с катодом K_1 : 1 — с емкостного делителя, 2 — с пояса Роговского, 3 — с СВЧ-детектора; *b* — осциллограмма импульса с СВЧ-детектора для ЛОВ с катодом K_4 .

(диаметрами) $\varnothing_s < 3$ mm. Очевидно, эта закономерность имеет место при выполнении условия

$$a \ll 2\pi b, \quad (1)$$

где a — шаг расположения стержней, b — наименьшее расстояние между эмитирующей кромкой и анодом,

$$a = 2\pi R_k / N. \quad (2)$$

Если выполняется условие

$$a < \varnothing_s, \quad (3)$$

что соответствует катоду K_2 , то струи на мишенях не проявляются и пучок выглядит азимутально-однородным (рис. 3, 2). Если же выполняется

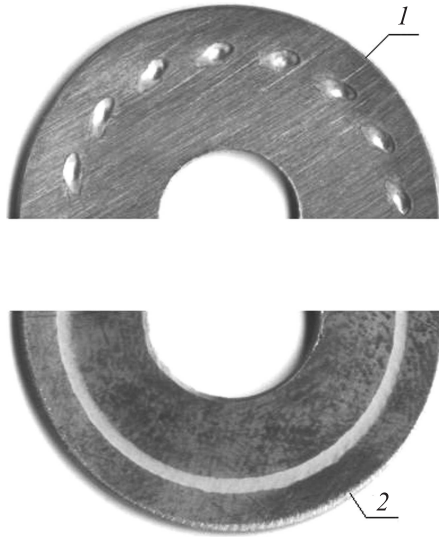


Рис. 3. Следы на медных мишенях от тонкостенных трубчатых электронных пучков, направляемых осевым магнитным полем, величиной $H_0 = 30 \text{ kOe}$: 1 — катод K_4 , 2 — катод K_2 .

условие

$$a \approx \varnothing_s, \quad (4)$$

что соответствует катоду K_3 , то наблюдается слабозаметная азимутально-регулярная неоднородность.

Рабочие характеристики ЛОВ с электронными пучками, полученными на катодах K_1 , K_2 , K_3 , отличаются друг от друга незначительно. В частности, близкие результаты дали измерения мощности и длительности импульсов выходного излучения, несущей частоты и энергетического КПД. В случае катода K_4 мощность выходного излучения была немного меньше (рис. 2, *b*), что можно объяснить увеличением полей высокочастотного пространственного заряда в струях, препятствующих образованию плотных электронных сгустков, т.е. препятствующих эффективной группировке электронов в ЛОВ. Для всех четырех разновидностей катодов были сняты зависимости мощности излучения ЛОВ от величины магнитного поля (H_0). На

качественном уровне полученные зависимости были одинаковы; при этом с уменьшением H_0 , начиная с $H_0 \approx 18$ кОе мощность излучения быстро падала, что связано с влиянием „циклотронного поглощения“, центр зоны которого находится вблизи $H_0 = H_r \approx 13$ кОе. В области полей 20 кОе $< H_0 < 25$ кОе наблюдались, по-видимому, побочные зоны „циклотронного поглощения“, смещенные относительно центра основной зоны (H_r) на достаточно большую величину $\Delta H_0 \approx 8$ кОе вследствие короткой длины рабочего пространства ЛОВ.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Катоды с малым шагом расположения тонких игольчатых стержней (3) позволяют формировать тонкостенные трубчатые пучки электронов с автоматическим выравниванием токов эмиссии в соседних стержнях, что способствует получению азимутально-однородных пучков с пониженным уровнем пульсаций, использование которых в генераторах ЛОВ может повысить стабильность выходного излучения и уменьшить время переходных процессов, т. е. время включения процесса генерации.

Выполнение условий (1) и $a \gg \varnothing_s$ позволяет сформировать сильно замагниченные электронные пучки, состоящие из обособленных струй, которые можно заключать в отдельные каналы. Это обстоятельство, в частности, позволяет использовать дырчатые коллекторы для мощных ЛОВ, работающих в частотных режимах генерации импульсов. При этом необходим учет дрейфа струй в азимутальном направлении, возникающего в скрещенных высокочастотном электрическом и направляющем магнитном полях.

Разбиение электронного пучка на отдельные струи можно использовать в качестве дополнительного средства селекции высокочастотных колебаний в автогенераторах ЛОВ.

Список литературы

- [1] Бурцев В.А., Зайцев Н.И., Ковалев Н.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 23. С. 1435–1438.
- [2] Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров / Под редакцией М.И. Петелина. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2002. С. 159.
- [3] Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 17–23.