

10

Низкоимпедансная релятивистская лампа обратной волны

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: kovalev@appl.sci-ppov.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2010 г.

Показано, что применение в релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) замедляющих систем в виде круглых волноводов с неглубокой прямоугольной гофрировкой позволяет повысить предельный ток электронного пучка через лампу. Идея проверялась численно и экспериментально на релятивистской ЛОВ трехсантиметрового диапазона длин волн с короткой однородной гофрированной системой и с резонансным рефлектором-модулятором. Проведенные эксперименты показали, что гигаваттная ЛОВ с взрывозмиссионной электронной пушкой и замедляющей системой в виде круглого волновода с неглубокой прямоугольной гофрировкой может эффективно работать на 60-омных электронных пучках.

Рассмотрен прямой метод повышения предельного тока электронного пучка в релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) с взрывозмиссионной сильноточной пушкой. Эта задача привлекательна во многих отношениях, поскольку позволяет, например:

— уменьшить сопротивление электронного пучка (или входной импеданс) и тем самым более полно реализовать возможности взрывозмиссионных сильноточных систем;

— уменьшить провисание, т.е. снижение потенциала пучка, и соответственно увеличить энергию движения электронов, а также отодвинуть границу возникновения отражающих виртуальных катодов;

— увеличить электропрочность стенок электродинамической системы за счет квазистатических полей пространственного заряда и тока пучка.

При увеличении предельного тока электронного пучка без увеличения плотности его зарядов можно также уменьшить и высокочастотные поля, разрушающие электронные сгустки.

Метод основан на применении замедляющих систем в виде круглых волноводов с неглубокой прямоугольной, в частности меандровой, гофрировкой, позволяющей более плотно прижать пучок к проводящим стенкам на всем пути следования электронов. Метод эффективен для тонкостенных пучков с малой скоростью поперечного дрейфа, что может быть обеспечено, например, увеличением направляющего магнитного поля.

Идея проверялась численно и экспериментально на релятивистской ЛОВ трехсантиметрового диапазона длин волн с короткой однородной гофрированной системой и с резонансным рефлектором-модулятором [1] в виде короткозамкнутой четвертьволновой радиальной линии (рис. 1, *a*). Для расчета электродинамической системы использовалась специально разработанная программа на основе поверхностно-граничных интегральных уравнений с выделением особенностей на ребрах, а для расчета режимов работы генератора применялся код КАРАТ [2]. Формы импульсов тока электронного пучка и ускоряющего напряжения на пушке выбирались одинаковыми (рис. 1, *b*), причем последний соответствовал условиям эксперимента (рис. 2, *a*).

Экспериментальный макет ЛОВ был рассчитан на 60-омный тонкостенный круглый электронный пучок с диаметром 27 мм и с током порядка 7.5 кА. В качестве пушки использовался магнитоизолированный коаксиальный диод с кромочным графитовым катодом. Амплитуда ускоряющего напряжения поддерживалась на уровне 450 кВ. В пушке была предусмотрена небольшая компрессия, изменением которой можно было с высокой точностью варьировать диаметр пуска.

В области взаимодействия электронов пучка с излучением направляющее магнитное поле выбиралось достаточно большим — 2.5–3 Т. При таком поле толщина стенки пучка не превышала 1 мм, что определялось в предварительных экспериментах по следу на торцевой мишени. Согласно этим же измерениям, радиальная скорость движения внешней границы пучка была меньше 10^6 см/с, что позволило довести величину минимального зазора между проводящей стенкой и пучком до 0.5–0.7 мм.

На рис. 2, *a* приведены осциллограммы с емкостного делителя, установленного в области электронной пушки, и с СВЧ-детектора,

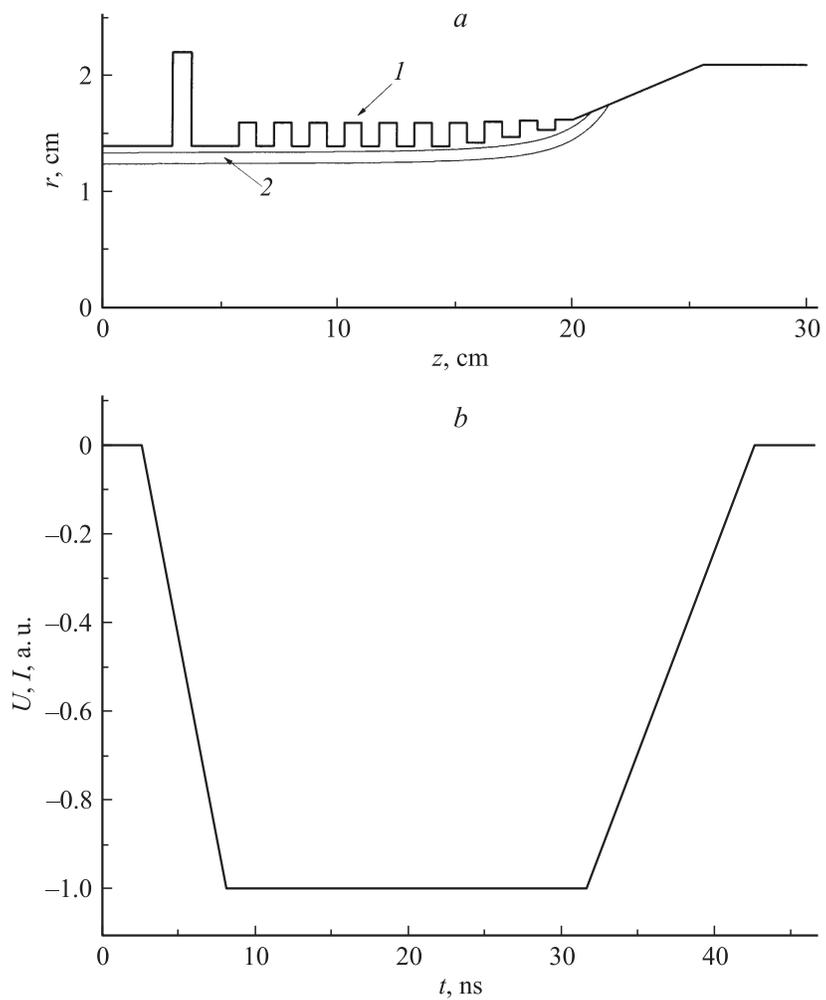


Рис. 1. *a* — схематическое изображение низкоимпедансной ЛОВ: *1* — электродинамическая система, *2* — электронный пучок; *b* — форма импульсов тока и напряжения, используемых в численных расчетах.

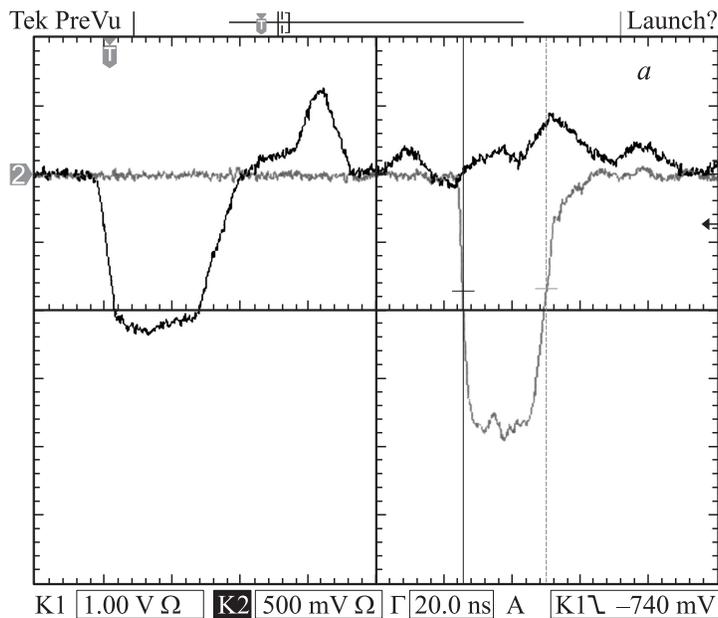


Рис. 2. *a* — осциллограммы импульса ускоряющего напряжения и выходного излучения низкоимпедансной ЛОВ, полученные в эксперименте (*a*); *b* — рассчитанный импульс огибающей выходного излучения низкоимпедансной ЛОВ и его положение относительно импульса напряжения, показанного пунктиром. Экспериментальные и численные данные получены при одних и тех же параметрах электронного пучка — токе $I = 7.5$ кА и ускоряющем напряжении $U = 450$ кВ.

установленного в промежуточной дифракционной зоне. На рис. 2, *b* приведен импульс огибающей выходного излучения, рассчитанный для тех же напряжения и тока рабочего пучка. Рассчитанный и экспериментальный импульсы хорошо соответствуют друг другу. В том и в другом случае фронт существенно короче спада и короче фронта импульса напряжения. Рассчитанная и измеренная мощности выходного излучения в пределах точности совпадают ($P = 0.9 - 1$ GW). В эксперименте мощность определялась интегрированием по диаграмме излучения. Совпали и частоты несущих ($f = 9.7$ GHz). Небольшие раз-

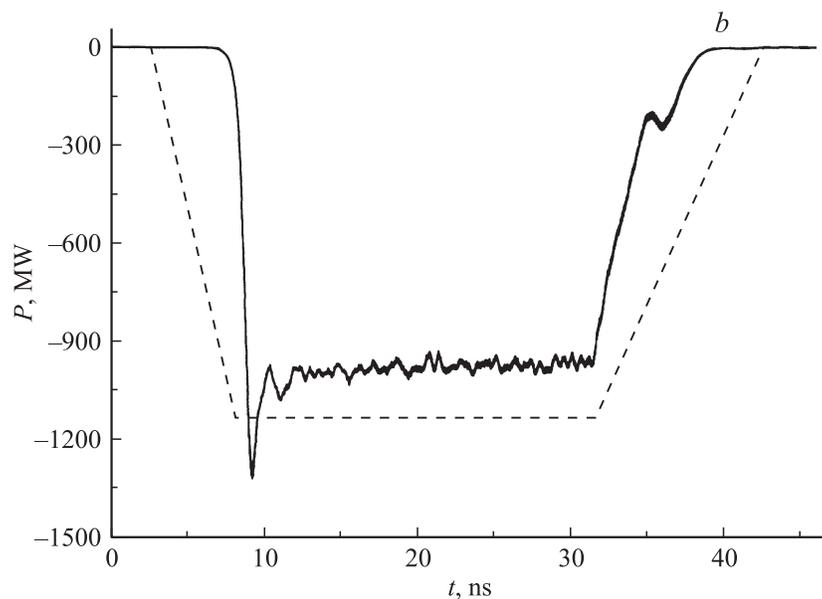


Рис. 2 (продолжение).

личия видны лишь в длительностях импульсов. Рассчитанный импульс на 1–2 ns продолжительнее измеренного, соответственно рассчитанное энергетическое КПД ($\eta = 0.26$) несколько больше экспериментального ($\eta = 0.22$). Но эти различия не мешают сделать следующие выводы.

1. В течение всего импульса (40 ns) функциональные свойства электродинамической системы низкоимпедансной гигаваттной ЛОВ остаются неизменными. В специальном эксперименте было также проверено, что через 80 ns после окончания импульса генерации электродинамическая система все еще сохраняет свои свойства.

2. В низкоимпедансной гигаваттной ЛОВ с замедляющей системой в виде круглого волновода с прямоугольной гофрировкой достижимы времена включения порядка нескольких наносекунд или нескольких десятков периодов выходного излучения. Соответственно достижимы высокие значения энергетического КПД (η), близкие по величине к КПД по мощности (η_P).

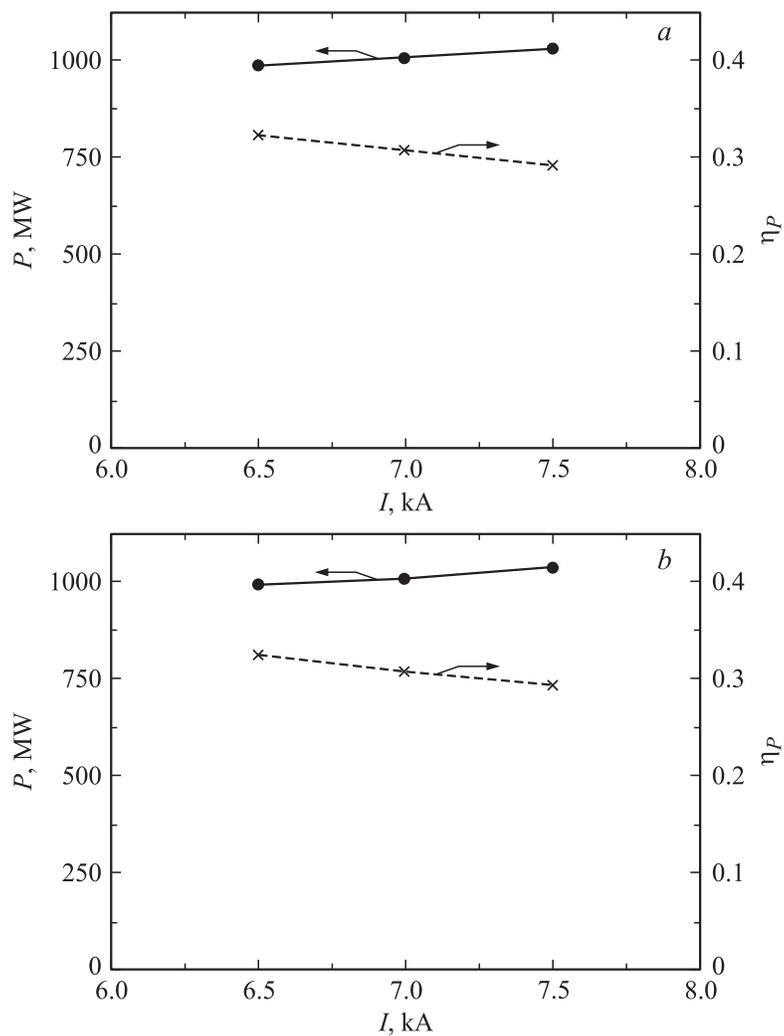


Рис. 3. Расчетные зависимости мощности выходного излучения (P) и КПД по мощности ($\eta_P = P/P_b$, $P_b = IU$) от тока электронного пучка (I) для двух значений ускоряющего напряжения: $U = 450$ кВ (a) и $U = 470$ кВ (b).

3. Путем увеличения магнитного поля и введения небольшой компрессии была достигнута скорость расплывания электронного пучка менее 10^6 cm/s, что позволило уменьшить величину токооседания до безопасного уровня.

4. Рассмотренный ЛОВ генератор работал вблизи границы жесткого возбуждения, но это не помешало реализовать благоприятные рабочие характеристики, некоторые из которых приведены в качестве примера на рис. 3.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что гигаваттная ЛОВ с взрывоэмиссионной электронной пушкой и замедляющей системой в виде круглого волновода с неглубокой прямоугольной гофрировкой может эффективно работать на 60-омных пучках. Замена синусоидальной формы гофрировки на прямоугольную позволила снизить максимальный зазор между пучком и проводящей поверхностью замедляющей системы более чем в 1.5 раза и соответственно увеличить ток пучка. Возможность дальнейшего снижения входного импеданса сопряжена с решением ряда принципиальных и технических проблем. К числу первых следует отнести исследование динамики взрывоэмиссионных пучков и исследование влияния периодических изменений параметров квазистатического и высокочастотного пространственных зарядов на режимы работы релятивистской ЛОВ. Ко второму классу проблем следует отнести задачи создания необходимых магнитных систем, упрочнения стенок электродинамических систем, минимизации тока обратного электронного пучка и т. д.

Авторы выражают благодарность В. П. Тарakanову за полезные консультации по использованию кода KARAT.

Список литературы

- [1] *Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 17–23.
- [2] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.