

09;12

## Релятивистская лампа обратной волны с плавной регулировкой длительности импульсов выходного излучения

© М.Б. Гойхман,<sup>1</sup> А.В. Громов,<sup>1</sup> В.В. Кладухин,<sup>2</sup> Н.Ф. Ковалев,<sup>1</sup> Н.Г. Колганов,<sup>1</sup> А.В. Палицин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт электрофизики УрО РАН,  
620016 Екатеринбург, Россия  
email: kovalev@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 18 августа 2011 г.)

Описано явление срыва генерации в низкоимпедансной релятивистской лампе обратной волны и рассмотрена возможность использования этого явления для оперативной регулировки длительности импульсов выходного излучения.

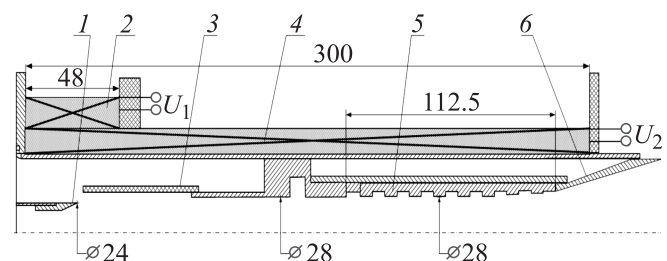
Опыт использования в прикладных исследованиях релятивистских ламп обратной волны (ЛОВ) показал, что в ряде случаев нужна оперативная перестройка длительности импульсов выходного излучения ( $\tau$ ). Причем во многих случаях это связано не только с обеспечением удобств проведения экспериментов, но и с самой возможностью их постановки. В качестве примера можно упомянуть работу [1], в которой исследовалась возможность применения фазированных антенных решеток (ФАР) на основе намагниченных ферритовых элементов для управления диаграммой излучения мощных ультракоротких сверхвысокочастотных (СВЧ) импульсов. Плавная и оперативная регулировка длительности излучения в этом случае позволила бы получить более корректные и более полные результаты о времени прозрачности ФАР и о факторах, влияющих на него.

В настоящей работе рассматривается вариант решения поставленной задачи, основанный на использовании явления срыва генерации, обнаруженном в релятивистских ЛОВ с нарастающим в течение импульса током электронного пучка. Эффект срыва генерации наблюдался и экспериментально исследовался на макете низкоимпедансной релятивистской ЛОВ [2] 3-сантиметрового диапазона длин волн с резонансным рефлектором-модулятором [3] и с короткой электродинамической системой (5 периодов), имеющей прямоугольную форму гофр. Схематический рисунок ЛОВ-генератора с основными размерами приведен на рис. 1. Осесимметричная электродинамическая система набиралась из отдельных плотно прижатых друг к другу секций. В качестве рабочей волны была выбрана основная осесимметричная волна электрического типа ( $E_{01}$ ). Излучение выводилось со стороны коллектора круглым многомодовым волноводом, соединенным с гофрированным отрезком плавным слабоотражающим и не переизлучающим в другие волны переходом, который выполнял еще и роль коллектора. Вакуумное окно диаметром 30 см было сделано из прозрачной лавсановой пленки толщиной 0.3 мм. Отражение от окна не превышало  $10^{-3}$  по мощности в широком диапазоне частот. Соленоид

направляющего магнитного поля ( $H_0$ ) был выполнен составным из основной и небольшой дополнительной катушек, запитываемых от независимых источников питания ( $U_1$  и  $U_2$ ). В экспериментах использовалась коаксиальная двухэлектродная пушка с взрывоэмиссионным кромочным катодом из плотного графита, который устанавливался в центре дополнительной катушки, что позволяло изменением тока в ней управлять оперативно и с высокой степенью точности величиной зазора ( $\Delta$ ) между пучком и стенкой в пространстве взаимодействия. Катододержатель был снабжен полированным экраном, уменьшающим ток обратного электронного пучка.

В экспериментах ЛОВ работала в режиме генерации одиночных импульсов, поэтому никаких специальных мер по принудительному охлаждению не предпринималось. Такой режим также провозволил использовать подвижную диэлектрическую вставку [4], изменением положения которой подбирались благоприятные формы импульсов напряжения и тока прямого электронного пучка. Для измерений основных параметров электронного пучка и выходного излучения были использованы следующие диагностические средства:

- пояс Роговского, установленный в области пушки и измеряющий ток только прямого электронного пучка;
- емкостной делитель, установленный перед изолятором на расстоянии 60 см от катода;



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — катод; 2, 4 — дополнительная и основная катушки магнитной системы, 3 — диэлектрическая вставка, 5 — замедляющая структура ЛОВ, 6 — коллектор.

- торцевой шпунт с цилиндром Фарадея;
- прозрачные торцевые мишени для электронного пучка с системой видеонаблюдения;
- полупроводниковый датчик на горячих носителях с фильтром-пробкой на 2-ю гармонику и с регулируемым источником питания;
- световое табло из тонковолокнистой поглощающей ткани с видеосистемой, позволяющей оперативно контролировать структуру поля излучения в ближней и переходной областях;
- СВЧ-калориметр;
- гетеродин со 100 kW магнетроном МИ-505;
- набор волноводных фильтров.

Во всех эксперимента импульсы ускоряющего напряжения и тока прямого электронного пучка были близки к приведенным на рис. 2. Как видно, в пределах „полочки“ напряжение падает почти линейно на 30%, ток монотонно нарастает до 9 кА, а мощность рабочего электронного пучка изменяется незначительно от 3 GW в начале до 3.2 GW в конце „полочки“. Спадающая форма импульса ускоряющего напряжение и нарастающая форма импульса тока объясняются движением плазмокатода. Такая форма импульсов (рис. 2) была получена на предварительном этапе путем подбора местоположения и

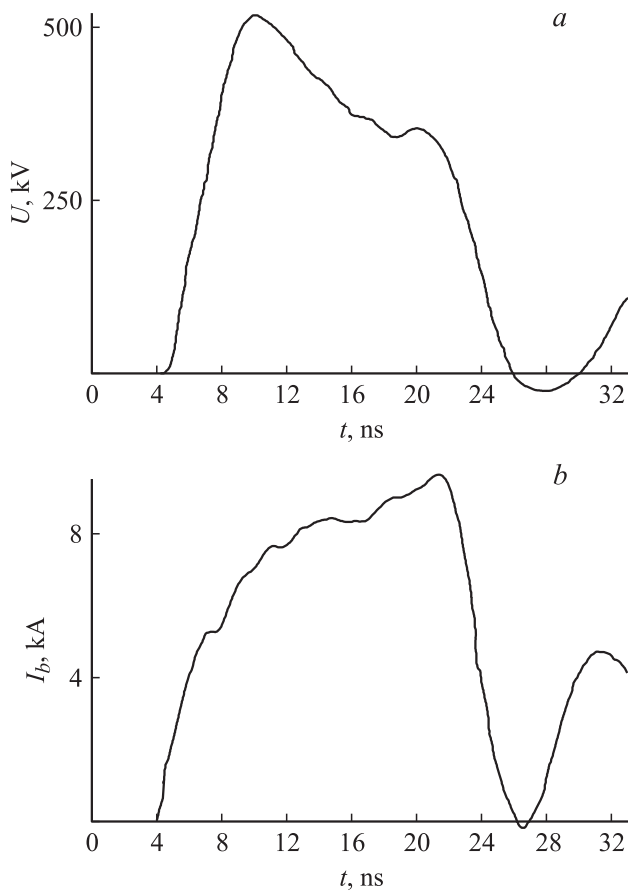


Рис. 2. Осциллограммы импульсов с емкостного делителя (a) и пояса Роговского (b).

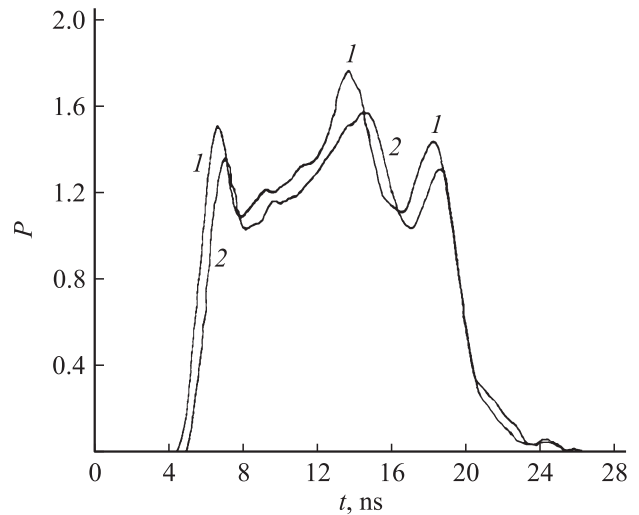


Рис. 3. Осциллограммы с СВЧ-датчика:  $\Delta$ , mm — 0.25 (1), 0.5 (2).

размеров диэлектрической анодной вставки и катодного узла, которые в дальнейшем не изменялись.

Согласно полученным результатам, при небольших зазорах

$$\Delta \leq 0.5 \text{ mm}$$

исследуемая ЛОВ работала в режиме генерации квази-прямоугольных импульсов (рис. 3) с предельно большой длительностью ( $\tau \approx 14 \text{ ns}$ ), ограниченной высоковольтным импульсом питания (рис. 2). Мощность выходного излучения достигала 1 GW. Частота генерации в пределах „полочки“ уменьшалась на 0.3 GW от 10.3 до 10 GHz, что характерно для ЛОВ-генераторов с уменьшающимся напряжением питания. Основные параметры ЛОВ в этом режиме работы указаны в таблице. При увеличении зазора ( $\Delta > 0.5 \text{ mm}$ ) наблюдалось укорочение

Основные параметры электронного пучка

Амплитуда ускоряющего напряжения $U_{\text{max}}$	530 kV
Амплитуда тока пучка $I_{b\text{max}}$	9.1 kA
Максимальная мощность пучка $P_{b\text{max}}$	3.2 GW
Длительность импульса тока по основанию $\tau_{b\text{max}}$	20 ns
Индукция фокусирующего магнитного поля $B_0$	3 T
Диаметр эмитирующей кромки катода $D_k$	24 mm
Средний диаметр электронного пучка в пространстве взаимодействия $D_b$	27 mm
Минимальный диаметр периодической системы $D$	28 mm
Длина периодической системы ( $N$ — число периодов)	5

Основные параметры выходного излучения

Максимальная мощность ( $P_{\text{max}}$ )	1 GW
Максимальная длительность импульса излучения по полувысоте ( $\tau_{\sim\text{max}}$ )	14 ns
Средняя длина волны излучения $\lambda_{\text{av}}$	3 cm
Максимальная ширина полосы излучения $(\Delta f/f)_{\text{max}}$	0.03

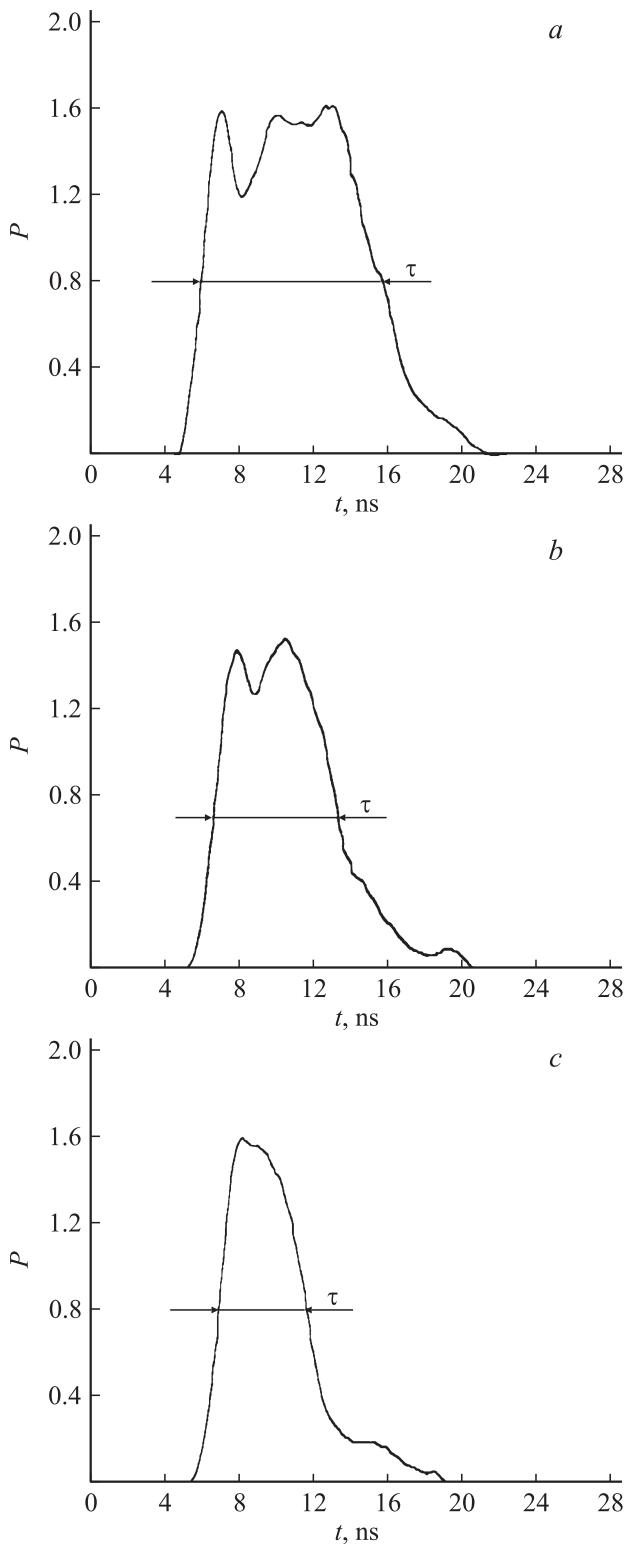


Рис. 4. Осциллограммы с СВЧ-датчика:  $\Delta$ , mm — 0.75 (a), 0.95 (b), 1.2 (c).

импульсов излучения (рис. 4). Причем в пределах

$$0.5 \text{ mm} < \Delta < 1.75 \text{ mm}$$

максимальная мощность оставалась практически неизменной ( $P \approx 1 \text{ GW}$ ). Незначительно изменялась и кру-

тизна спадов и фронтов, что видно из сравнения осциллограмм на рис. 4. При дальнейшем увеличении зазора  $\Delta \geq 1.75 \text{ mm}$  форма осциллограмм с СВЧ-датчика становилась треугольной (рис. 5) с быстро уменьшающейся до нуля амплитудой.

Прекращение генерации до окончания высоковольтного импульса можно интерпретировать как скачок или быстрый переход из одного стационарного состояния генерации в другое, поскольку он не сопровождается какими-либо пробойными явлениями или плазмообразованиями. Слабо влияют на него и другие факторы, например небольшое изменение напряжения, тока, структуры силовых линий и т.д. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать общий вывод о том, что эффект срыва генерации является внутренним свойством релятивистской ЛОВ, момент возникновения которого ( $\tau$ ) зависит только от величины перепадов ускоряющих напряжений и токов прямого электронного пучка и, что главное, от величины зазора  $\Delta$ . Соответ-

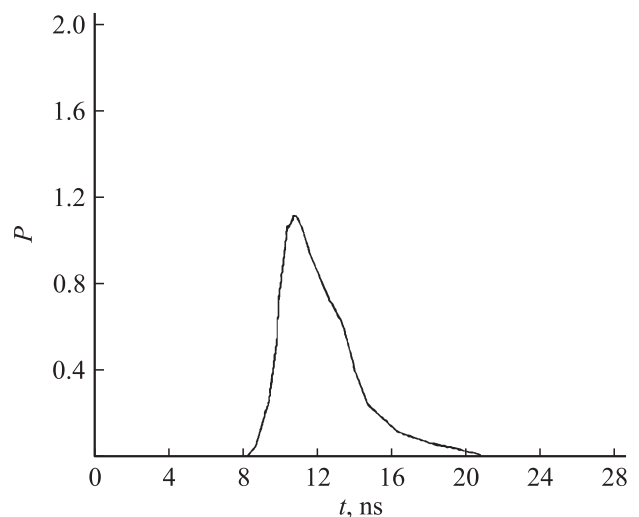


Рис. 5. Осциллограммы с СВЧ-датчика.  $\Delta = 1.75 \text{ mm}$ .

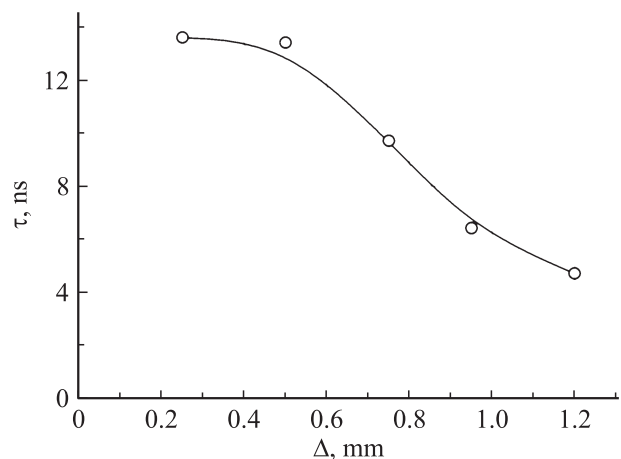


Рис. 6. Зависимость длительности импульса излучения  $\tau$  от зазора  $\Delta$ , построенная с использованием рис. 3 и 4.

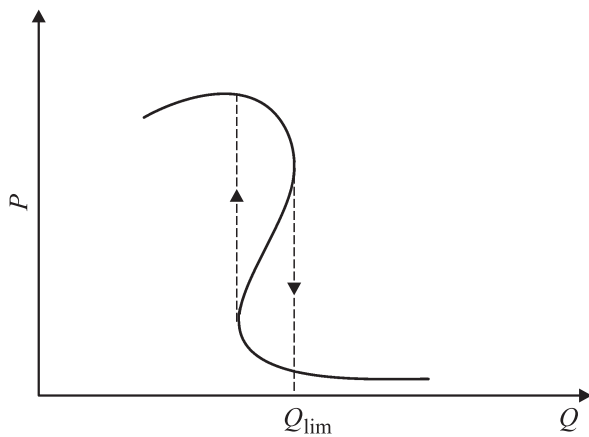


Рис. 7. Кривая стационарных состояний лампы обратной волны на плоскости  $(P, Q)$ .

ственно в качестве основной количественной характеристики этого явления удобно выбрать зависимость

$$\tau = \tau(\Delta).$$

Качественный вид этой зависимости для исследованного ЛОВ-генератора приведен на рис. 6, из которого хорошо видно, что эффект срыва генерации легко реализуем и вполне пригоден для плавной и оперативной регулировки длительности  $\tau$  путем изменения тока в дополнительной катушке, если учесть зависимость

$$\Delta = \Delta(H_0).$$

Обнаруженный в экспериментах с низкоимпедансной релятивистской ЛОВ эффект срыва генерации можно объяснить Z-образной зависимостью стационарных состояний генерации от величины квазистатического поля высокочастотного пространственного заряда, в качестве характеристики которого здесь принята отвлеченная величина

$$Q = Q(J_b, U, \Delta, \dots).$$

Параметр  $Q$  возрастает при уменьшении  $U$ , увеличении  $J_b$  и увеличении  $\Delta$ . Возможный вид кривой стационарных состояний в плоскости  $(P, Q)$  показан на рис. 7. Если импульсы ускоряющего напряжения и тока пучка имеют вид, как на рис. 2, то параметр пространственного заряда  $Q$  будет увеличиваться в интервале

$$Q_1 < Q < Q_2,$$

границы которого зависят от величины зазора  $\Delta$ . Если подбором  $\Delta$  удовлетворить условию

$$Q_1 < Q_{\text{lim}} < Q_2,$$

то перескок или срыв генерации произойдет до окончания питающего импульса (см. рис. 7). Отсюда очевидно, что изменением зазора  $\Delta$  можно плавно изменять момент срыва. Очевидно также, что динамика перехода

не зависит от величины  $\Delta$ , мало изменяться должна и амплитуда импульсов выходного излучения, что и наблюдалось в экспериментах (рис. 4).

## Заключение

Предложенный метод плавной регулировки длительности импульсов излучения с постоянной амплитудой в гигаваттных ЛОВ удобен при выполнении поисковых исследований, когда не важна частота следования импульсов и допустимы значительные снижения энергетического КПД.

Нужно отметить, что возможности предложенного метода до конца еще не ясны. Не в полной мере выяснены и свойства обнаруженного явления срыва генерации. Тем не менее уже сейчас понятно, что это явление универсально и условия его возникновения не уникальны. Возможно, им объясняются часто наблюдаемые укорочения импульсов выходного излучения в мощных релятивистских ЛОВ с сильноточными электронными пучками.

## Список литературы

- [1] Голубцов Е.А., Данилов Е.А., Кашин В.А., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Кузнецов А.С. // Антенны. 2008. № 5. С. 8–15.
- [2] Гойхман М.Б., Громов А.В., Кладухин В.В., Ковалев Н.Ф., Колганов Н.Г., Палицин А.В., Храпцов С.П. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 7. С. 87–93.
- [3] Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 10. С. 17–23.
- [4] Бечаснов А.М., Братман В.Л., Колганов Н.Г., Мишакин С.В., Самсонов С.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 3. С. 96–103.