

09;10

## Релятивистская лампа обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором

© С.Д. Коровин, В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов

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

Поступило в Редакцию 23 декабря 2004 г.

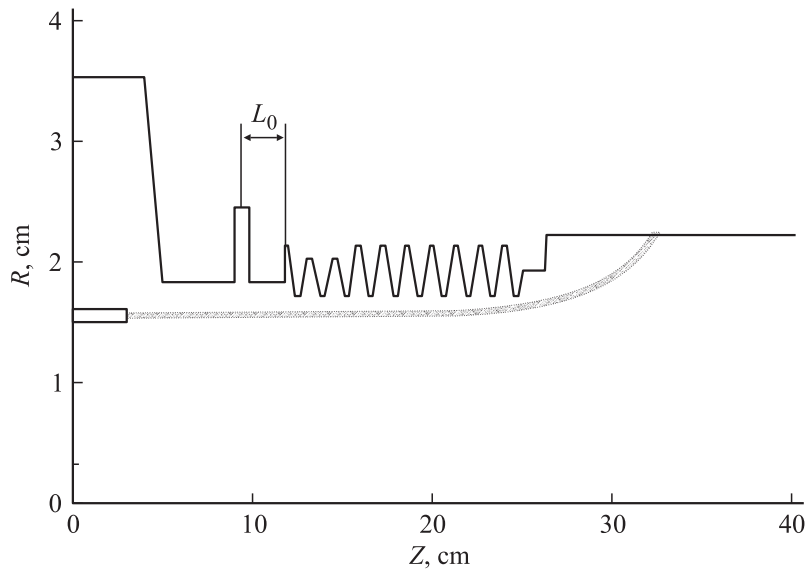
Численно и экспериментально исследован эффективный релятивистский СВЧ-генератор на основе лампы обратной волны с резонансным рефлектором. Получена генерация импульсов длительностью до 12 ns с несущей частотой 9.93 GHz и мощностью  $0.75 \pm 0.11$  GW. Относительно стабильный от импульса к импульсу режим генерации характеризовался эффективностью преобразования мощности из сильноточного электронного пучка ускорителя СИНУС-БК до 40%.

В данной работе продолжено исследование схемы релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ), содержащей резонансный рефлектор в качестве отражателя встречной волны [1,2]. Если в предыдущих исследованиях основное внимание уделялось задаче повышения эффективности генерации в относительно слабых магнитных полях (до циклотронного резонанса), то целью данной работы было исследование возможности повышения эффективности генерации в общем случае сильно замагниченного электронного пучка.

Предложенная схема генератора по отношению к традиционному варианту релятивистской ЛОВ с запредельным сужением имеет ряд отличительных особенностей. Среди них: умеренное (приблизительно в 1.5 раза) увеличение поперечного размера замедляющей системы (ЗС) и существенная роль предварительной модуляции электронного пучка в области сосредоточенного рефлектора. Первое отличие приводит к относительно меньшему вкладу несинхронных волн во взаимодействии частиц и полей в сравнении с синхронной  $(-1)$ -й пространственной гармоникой встречной волны в гофрированном волноводе и представляется важным при генерации высоких уровней импульсной микроволновой

мощности с точки зрения повышения электрической прочности ЗС. Наличие эффективной модуляции частиц по скорости обеспечивает селективное возбуждение рабочей моды  $E_{01}$  и делает данный прибор похожим на двухсекционные генераторы с распределенной областью торможения сгустков, например, на твистрон, для которого теоретическое значение эффективности достигает 60% [3,4]. Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования подтвердили эту аналогию, показав, что эффективность генерации зависит как от положения резонансного рефлектора относительно ЗС, изменяющего фазу модуляции частиц относительно синхронной волны, так и глубины модуляции пучка. При оптимальном положении резонансного рефлектора, когда на входе в ЗС формирующийся сгусток оказывается вблизи середины тормозящей фазы поля синхронной волны, расчетная эффективность генератора может достигать около 60% в ультрарелятивистском случае и несколько выше в случае умеренно релятивистских энергий [2]. Однако реализация подобных режимов в эксперименте трудно осуществима по той простой причине, что в этом случае значительно возрастает стартовый ток генератора. Проведенные ранее экспериментальные исследования продемонстрировали возможность получения КПД генерации около 25% в магнитных полях ниже и выше области циклотронного поглощения встречной волны [1]. Основной резерв для дальнейшей оптимизации был связан с выбором амплитуды и фазы модуляции частиц в области рефлектора, а также профиля продольного распределения сопротивления связи в ЗС. Кроме этого, в процессе численного моделирования варьировался импеданс вакуумного диода сильноточного ускорителя (рис. 1).

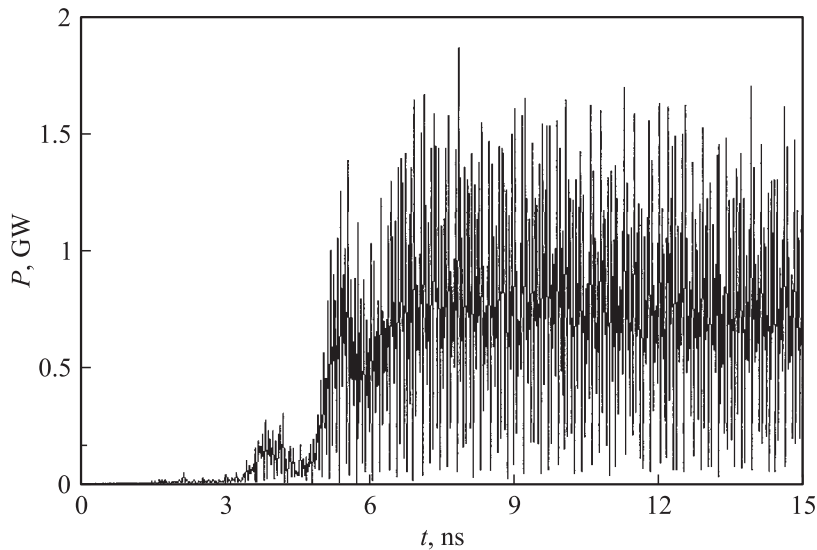
Выбор оптимальной глубины модуляции частиц и предварительная оценка параметров генератора в приближении бесконечно узкого зазора производились в численном расчете на основе приближения одномерного движения частиц без их остановки и разворота [2]. Анализ электродинамических характеристик ЗС, рефлектора и выбор геометрии согласующего элемента на коллекторном краю ЗС производился с помощью специальной программы, использующей метод матриц рассеяния [5]. Последующая оптимизация в моделировании производилась методом крупных частиц (программа „KARAT“ [6]). Окончательно в расчетах использовался электронный пучок с током 3.9 кА, ускоряемый импульсным напряжением амплитудой 480 кВ. В конечной геометрии сопротивление связи на большей части длины ЗС



**Рис. 1.** Схема лампы обратной волны с резонансным рефлектором.

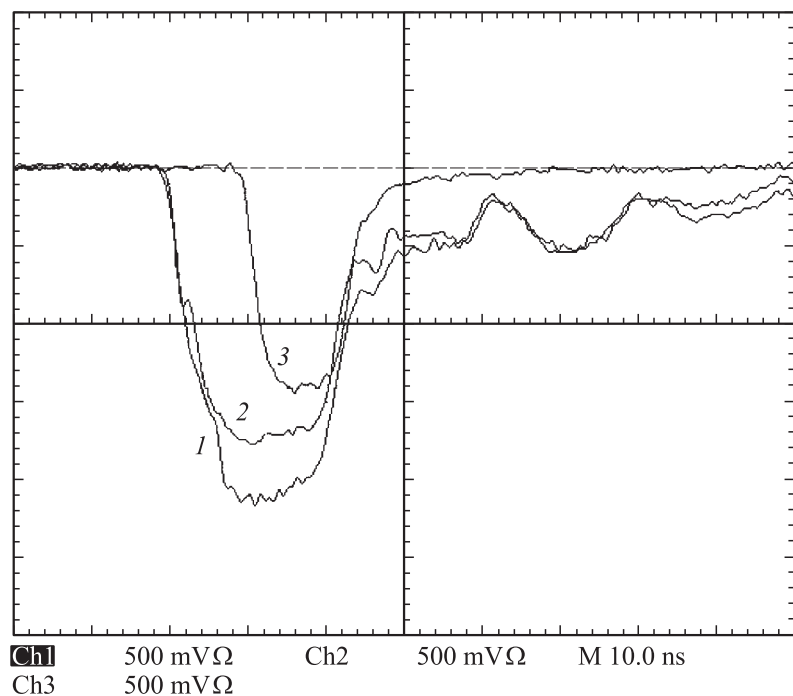
составило  $1.9 \Omega$ . Использовалось ведущее продольное магнитное поле с индукцией  $3 \text{ Т}$ . Оптимальному режиму соответствовало положение резонансного рефлектора относительно ЗС (рис. 1)  $L_0 = 24 \text{ мм}$ . Расчетная эффективность генератора равнялась  $40\%$  при установившемся уровне мощности  $0.75 \text{ ГВт}$ . Достаточно сложная динамика переходного процесса (рис. 2) связана с наличием в спектре колебаний (по выборке  $0\text{--}6 \text{ нс}$ ) равноправных компонент с частотами  $8.6$  и  $10 \text{ ГГц}$ . При переходе в стационарный режим наблюдалась одночастотная генерация со спектральной компонентной  $10 \text{ ГГц}$ . При удалении рефлектора от ЗС время выхода в стационарный режим сокращалось (снижался стартовый ток генератора), а признаки конкуренции на нелинейном этапе переходного процесса исчезали. Вместе с тем за счет смещения центра сгустка ближе к границе ускоряющих и тормозящих фаз поля синхронной волны происходило снижение эффективности генератора.

Эксперимент был выполнен с использованием импульсно-периодического наносекундного ускорителя электронов „СИНУС-6К“, который



**Рис. 2.** Не усредненный по времени поток мощности вблизи поглотителя в оптимальном режиме численного моделирования.

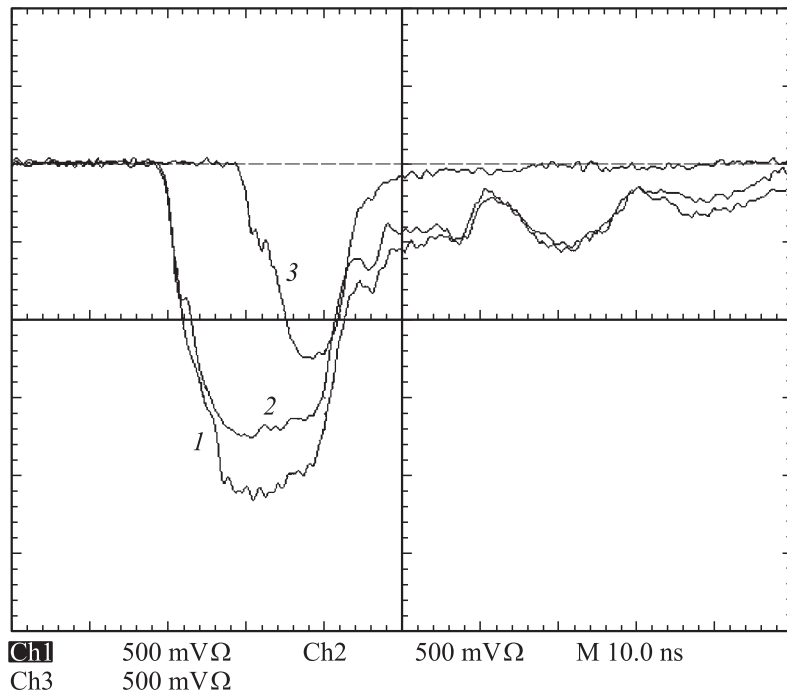
генерировал в однократном режиме электронный пучок с длительностью около 20 ns при напряжении на катоде  $\approx 500$  kV и токе диода  $\approx 4$  kA. В эксперименте был получен устойчивый режим генерации при  $L_0 = 24.5$  mm с эффективностью  $\approx 37 \pm 5\%$  на частоте 9.93 GHz (рис. 3). Индукция продольного магнитного поля составляла 2.7 Т. Ширина спектра на уровне  $-3$  dB не превышала 100 MHz. Микроволновая мощность, измеренная путем интегрирования диаграммы направленности, составила  $0.75 \pm 0.11$  GW. Форма импульса тока в оптимальном режиме свидетельствует о появлении некоторой доли (несколько процентов) обратного потока электронов, обусловленного их остановкой и разворотом в сильных ВЧ-полях в режиме установившихся колебаний. Появление обратного потока электронов также наблюдалось и в численном эксперименте. Среднеквадратичное отклонение амплитуды микроволновых импульсов в указанном режиме работы генератора приблизительно в 2–3 раза превышало соответствующее значение для амплитуд ускоряющего напряжения на катоде.



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов напряжения на катоде 1, тока диода 2 и сигнал с микроволнового детектора 3.

При приближении рефлектора к ЗС уже при  $L_0 = 24.0$  mm воспроизводимость импульсов существенно нарушалась, при этом относительный разброс амплитуд импульсов мог превышать 100%. В этом режиме наблюдались сигналы как с малой амплитудой, так и с большой амплитудой и признаками сложной динамики переходного процесса (рис. 4). С учетом повышения несущей частоты до 10.8 GHz в режиме малых амплитуд микроволновых импульсов, по-видимому, их можно идентифицировать с резонансными колебаниями ЗС вблизи  $\pi$ -вида моды  $E_{01}$ .

При смещении резонансного рефлектора в обратном направлении относительно случая  $L_0 = 24.5$  mm эффективность генерации снижалась при некотором увеличении длительности микроволновых импуль-



**Рис. 4.** Осциллограмма сигнала с лампового детектора 3 при смещении рефлектора на 0.5 mm от оптимального положения по направлению к ЗС генератора.

сов и их стабильности. Варьирование длины ЗС при оптимальном положении резонансного рефлектора не приводило к повышению КПД генератора. Также было отмечено, что с увеличением мощности электронного пучка эффективность генерации снижалась.

Таким образом, при оптимальном положении резонансного рефлектора и глубине модуляции частиц по скорости перед ЗС эффективность генерации в эксперименте составила 37%. Вблизи оптимального режима по эффективности показано, что дальнейшее наращивание эффективности генератора сопряжено с проблемой нелинейной конкуренции и возбуждением незапланированных колебаний.

## Список литературы

- [1] Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 10. С. 43–47.
- [2] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [3] Ковалев Н.Ф., Кольчугин Б.Д., Кротова З.Н. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 12. С. 2636.
- [4] Ковалев Н.Ф., Кольчугин Б.Д., Кротова З.Н. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 6. С. 1309.
- [5] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. N 4. P. 745–752.
- [6] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.