

09;10

## **Релятивистская лампа обратной волны с механической перестройкой частоты генерации**

© С.А. Кицанов, С.Д. Коровин, А.И. Климов,  
В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов

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

Поступило в Редакцию 26 января 2004 г.

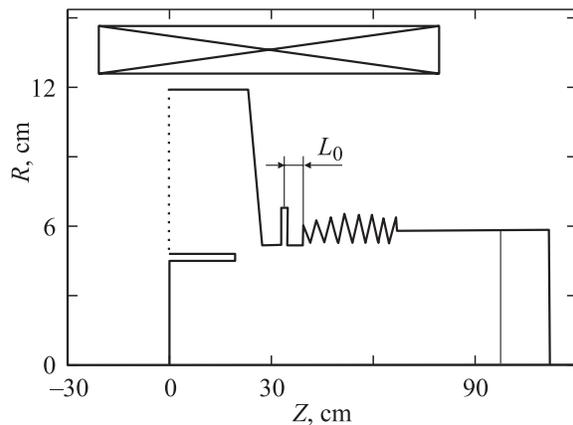
Экспериментально реализован мощный релятивистский СВЧ-генератор в низком магнитном поле на основе лампы обратной волны с резонансным рефлектором. Для фиксированных параметров замедляющей системы и электронного пучка продемонстрирована механическая перестройка частоты генерации в полосе 12% посредством перемещения рефлектора относительно замедляющей структуры. Максимальная импульсная мощность излучения  $4 \pm 1$  GW с несущей частотой 3.6 GHz получена при значении магнитного поля 4.6 kOe.

В последнее время большое внимание уделяется разработке и созданию мощных релятивистских СВЧ-генераторов с широким диапазоном перестройки частоты генерации. Для данного класса приборов релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ) является одним из эффективных источников мощного электромагнитного излучения. Для нее характерны малое время переходного процесса и высокая адаптивность к изменению параметров электронного пучка. Однако в релятивистской области энергий электронного пучка полоса перестройки частоты генерации ЛОВ невелика и составляла 3–4% [1], главным образом за счет смещения запердельного отрезка волновода относительно замедляющей системы (ЗС). Следующим шагом, позволившим увеличить

механическую перестройку частоты до 15% по половинному уровню мощности, было изменение периода ЗС при одновременной подстройке положения запердельного отрезка волновода [2]. В этих вариантах для получения высоких уровней импульсной мощности и эффективности генерации требовалось магнитное поле в области выше циклотронного резонанса. В этом случае влияние магнитного поля на расстройку черенковского синхронизма было незначительным.

В настоящей работе исследована другая возможность механической перестройки частоты, связанная не с изменением геометрии ЗС, а с использованием эффекта предварительной модуляции частиц по скорости и управления фазой высокочастотного тока относительно синхронной волны на входе в ЗС (фазой модуляции). В данной схеме отражение обратной волны от широкополосного резонансного рефлектора в виде сосредоточенной неоднородности реализуется вследствие возбуждения запертой симметричной моды с увеличенным на единицу радиальным индексом. Проведенный ранее анализ [3] стартовых условий показал, что фаза модуляции, которая может регулироваться смещением рефлектора, существенно влияет на нормированную стартовую длину и расстройку синхронизма. Важно, что зависимость расстройки синхронизма от этой фазы в целом сохраняется и в нелинейном режиме. Следует отметить очевидный результат решения краевой задачи, заключающейся в расширении диапазона изменения расстройки, а следовательно и частоты генерации, с ростом амплитуды модуляции частиц по скорости в области рефлектора. В свою очередь, для того чтобы не происходило снижения КПД, при этом необходимо корректировать параметры ЗС в направлении сокращения ее длины.

Как было показано ранее [4], использование электродинамической системы с увеличенным поперечным размером за счет сохранения селективных свойств вследствие эффекта предмодуляции не только снижает вероятность высокочастотного пробоя при высокой импульсной мощности электромагнитного излучения, но и создает предпосылки для сохранения высокой эффективной генерации в магнитных полях ниже области циклотронного провала. По существу, затраты мощности на создание магнитного поля при работе генератора в импульсно-периодическом режиме удалось снизить более чем на порядок при КПД генератора около 20%. В данных исследованиях приходилось учитывать и корректировать эффекты влияния напряженности магнитного поля на КПД и частоту генерации.

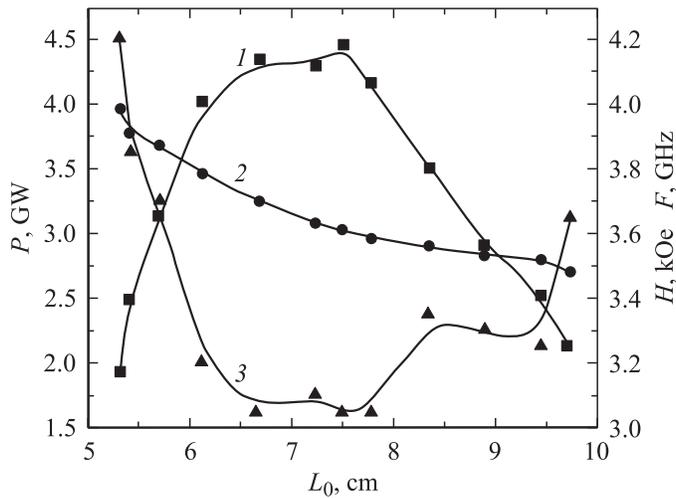


**Рис. 1.** Схема ЛОВ с резонансным рефлектором.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование возможности механической перестройки частоты генерации свыше 10% для мультигигаваттной генерации в 8-сантиметровом диапазоне за счет сдвига всей ЗС как целого относительно рефлектора.

Для оптимизации геометрии генератора (рис. 1) был проведен численный эксперимент с использованием полностью электромагнитного кода KARAT [5]. В исследуемой геометрии средний диаметр гофрировки приблизительно в 1.5 раза превышает длину волны излучения (рабочая мода  $E_{01}$ ). Из расчетов были определены оптимальные параметры электронного пучка: напряжение на катоде  $\approx 1.2$  MV, ток пучка  $\approx 12.5$  kA. Варьирование магнитного поля в процессе моделирования выявило достаточно узкий диапазон от  $\approx 2.5$  до  $\approx 4.5$  kOe, в котором реализуется устойчивая генерация. Ограничение снизу связано с ростом поперечных скоростей электронов пучка при его формировании в области электронного диода, а сверху — с циклотронным поглощением встречной волны. Расчеты, проведенные для нескольких положений резонансного рефлектора относительно ЗС генератора, показали, что при смещении отражателя ( $L_0$ ) происходит сдвиг частоты генерации, который составляет  $\approx 100$  MHz/cm (рис. 2).

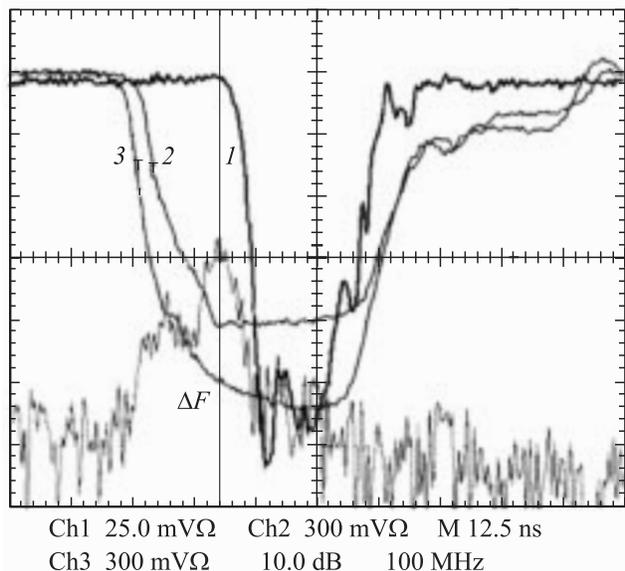
Следует заметить, что для получения в расчетах максимальной перестройки частоты по половинному уровню мощности



**Рис. 2.** Зависимости мощности генерации 1, частоты генерации 2 и оптимального значения магнитного поля 3 от длины участка дрейфа  $L_0$ .

$F_{\max}/F_{\min} - 1 \approx 14\%$  (3.48–3.95 GHz) требуется некоторая подстройка по магнитному полю. Вероятно, это связано с изменением условий циклотронного поглощения встречной волны при смещении частоты генерации. Максимальная расчетная мощность генерации  $\approx 4.5$  GW соответствует эффективности  $\approx 32\%$ . В процессе численного моделирования было отмечено возрастание длительности переходного процесса при приближении к режимам, соответствующим крайним частотам полосы перестройки. Данный эффект можно напрямую объяснить ростом стартового тока генератора при фиксированном токе пучка.

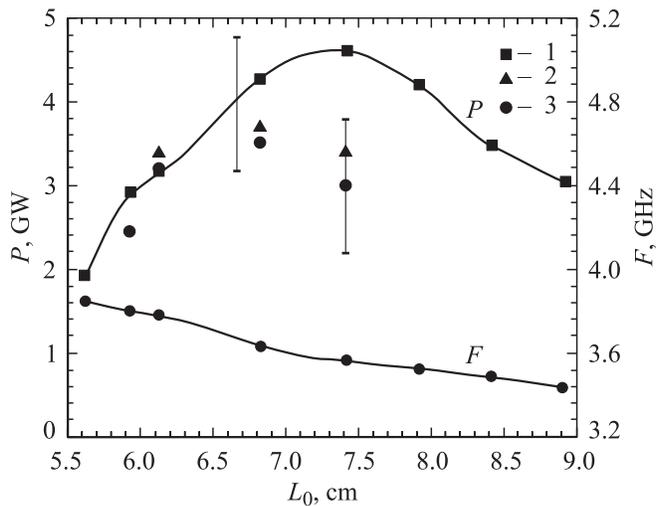
Эксперимент был выполнен с использованием импульсно-периодического наносекундного ускорителя электронов „СИНУС-7“, который генерировал в однократном режиме электронный пучок с длительностью около 50 ns при напряжении на катоде  $\approx 1.2$  MV и токе диода  $\approx 16$  kA. Амплитуда тока пучка, поступающего в электродинамическую систему генератора, возрастала с ростом магнитного поля и стабилизировалась при  $H \approx 4$  kOe на уровне  $\approx 13$  kA. В этом случае не происходило касания пучком внутренних поверхностей волноводов, примыкающих слева и справа к резонансному рефлектору. Существен-



**Рис. 3.** 1 — сигнал с волноводно-полоскового ответвителя, 2 — напряжение на катоде, 3 — ток диода,  $\Delta F$  — результат Фурье-преобразования сигнала с гетеродина. Частота генерации:  $F_1 = F_2 - \Delta F$ . Ток диода  $\approx 16$  кА, напряжение на катоде  $\approx 1.2$  МВ,  $H \approx 4.6$  кОе, частота гетеродина  $F_2 = 3.9$  GHz,  $\Delta F \approx 0.34$  GHz.

ная разница между вышеуказанными токами ( $\approx 3$  кА), по-видимому, обусловлена утечками в области вакуумного диода.

Измерения мощности генерации проводились с использованием калиброванного ненаправленного волноводно-полоскового ответвителя, короткого симметричного вибратора в качестве приемной антенны и апертурного калориметра. Спектр излучения определялся гетеродинным методом путем обработки сигнала промежуточной частоты осциллографом TDS-644 А с помощью аппарата быстрого преобразования Фурье. На рис. 3 представлен сигнал с волноводно-полоскового ответвителя и гетеродинного измерителя частоты генерации, полученный для положения резонансного рефлектора  $L_0 = 7.4$  см. Некоторая изрезанность в форме СВЧ-сигналов, по-видимому, связана с отражением части СВЧ-мощности от выходного окна излучающего рупора. Поскольку при



**Рис. 4.** Зависимости пиковой мощности и частоты генерации от положения резонансного рефлектора: 1 — измерения пиковой мощности с помощью волноводно-полоскового ответвителя ( $P$ ), 2 — апертурного калориметра (без учета долей отраженной и рассеянной СВЧ-мощности), 3 — короткого симметричного вибратора.

каждом фиксированном положении рефлектора наблюдалась зависимость мощности и частоты генерации от магнитного поля, в каждом режиме по  $L_0$  выбирался необходимый режим по магнитному полю. Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных можно реализовать следующий вариант перестройки частоты генерации релятивистской ЛОВ (рис. 4). В пределах указанной полосы магнитное поле менялось от 4.1 до 4.9 кОе.

Следует отметить существование некоторой нестабильности СВЧ-импульса по амплитуде и длительности, а также по частоте генерации вблизи крайних частот полосы перестройки. Данная нестабильность может быть связана с конкуренцией со стороны паразитных колебаний (в эксперименте наблюдалась генерация на частотах 3.2 и 4.5 GHz) и недостаточной длительностью импульса напряжения ускорителя.

Таким образом, в работе реализована механическая перестройка частоты генерации релятивистской ЛОВ посредством перемещения резонансного рефлектора относительно ЗС при фиксированных пара-

метрах гофрировки и электронного пучка. В оптимальном режиме по положению резонансного рефлектора в эксперименте получена пиковая мощность одномодовой генерации  $4 \pm 1$  GW, что соответствует эффективности  $\approx 25\%$ . Механическая перестройка частоты по половинному уровню мощности составила  $\approx 12\%$  ( $3.44 \div 3.85$  GHz).

## Список литературы

- [1] Коровин С.Д., Полевин С.Д., Ройтман А.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. Т. 39. № 12. С. 49–55.
- [2] Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 87–94.
- [3] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [4] Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 10. С. 43–47.
- [5] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.