

## Релятивистская лампа обратной волны с полосой механической перестройки частоты генерации 14%

© Е.М. Тотьменинов, П.В. Выходцев, С.А. Кицанов, А.И. Климов, В.В. Ростов

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: totm@lfe.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 30 марта 2010 г.)

Экспериментально реализован перестраиваемый по частоте релятивистский СВЧ-генератор в низком магнитном поле на основе релятивистской лампы обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором. Изменение частоты генерации осуществлялось посредством механического перемещения замедляющей структуры генератора относительно рефлектора. При фиксированных параметрах гофрировки и электронного пучка реализован режим с полосой перестройки частоты около 14% по уровню  $-3$  dB от максимальной по диапазону пиковой СВЧ-мощности. Максимальная импульсная мощность излучения  $3.4 \pm 0.7$  GW с несущей частотой около 3.65 GHz получена при значении магнитного поля 0.44 T.

### Введение

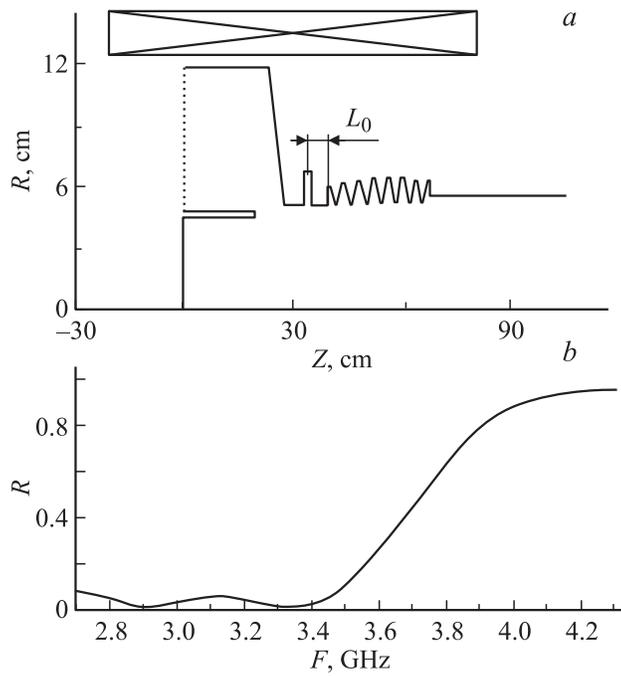
Настоящая работа продолжает цикл исследований о возможности расширения полосы перестройки частоты генерации релятивистской лампы обратной волны с резонансным рефлектором (РЛОВ-РР). Ранее был численно предсказан и экспериментально реализован режим генерации РЛОВ-РР с полосой механической перестройки частоты около 12% (расчетное значение составляло 14%) [1,2]. В основе данного способа перестройки лежит использование эффекта предварительной модуляции частиц по скорости в области резонансного рефлектора и управления фазой высокочастотного тока относительно синхронной волны на входе в замедляющую систему (ЗС) генератора (фазовой модуляции), которое регулируется изменением длины участка дрейфа между рефлектором и входом в ЗС [3]. Также было показано, что расширению полосы перестройки до расчетного значения 14% препятствовали конкуренция со стороны паразитных колебаний и недостаточная длительность импульса напряжения ускорителя [1]. Таким образом, для дальнейшего расширения полосы требуется решить ряд проблем. Необходимо повысить селективные свойства электродинамической системы генератора, чтобы исключить возбуждение конкурирующих колебаний. Также важно обеспечить снижение стартового тока генератора, чтобы возбуждение рабочей волны успевало происходить при заданной длительности импульса напряжения ускорителя.

В основе предложенного в данной работе метода повышения селективности электродинамической системы РЛОВ и снижения стартового тока генератора лежат усиление отражения части микроволновой мощности от выхода ЗС генератора и увеличение степени неоднородности ЗС. Усиления отражения микроволновой мощности можно достичь за счет большего рассогласования ЗС на коллекторном конце с примыкающим гладким волноводом. Такой прием усиливает дополнительную

обратную связь в генераторе и приводит к снижению стартового тока генератора для рабочей волны. Представляет интерес исследование возможности подавления конкурирующих резонансных колебаний электродинамической системы за счет увеличения неоднородности ЗС и соответственно сокращения длины однородного участка гофрировки.

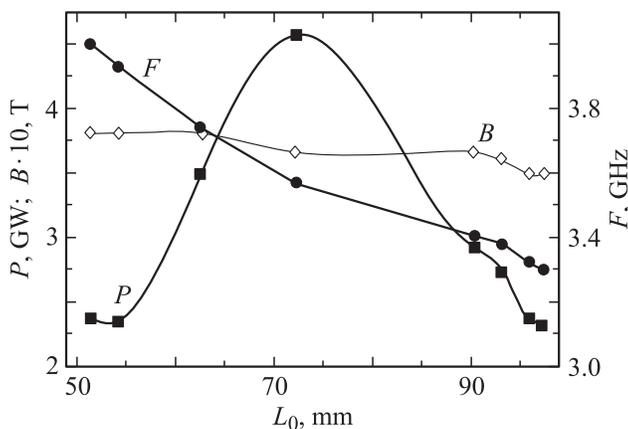
### Численный эксперимент

Для оптимизации геометрии генератора (рис. 1, *a*) был проведен численный эксперимент с использованием осесимметричной версии полностью электромагнитного кода KARAT [4]. В исследуемой геометрии средний диаметр гофрировки приблизительно в 1.5 раза превышает длину волны излучения (рабочая волна  $TM_{01}$ ). В сравнении с геометрией генератора, описанной в работе [1], была увеличена амплитуда гофрировки для трех первых периодов ЗС, а также оптимизирован выход ЗС с точки зрения усиления отражения микроволновой мощности. Анализ полосовых свойств ЗС показал, что вблизи верхней границы перестройки отражение мощности от выхода генератора может составлять до 90% (рис. 1, *b*). Были определены оптимальные параметры электронного пучка: напряжение на катоде  $\approx 1.2$  MV, ток пучка  $\approx 12.5$  kA. Расчетный диапазон магнитных полей, где наблюдалась устойчивая генерация, составлял 0.3–0.5 T. Ограничение снизу по магнитному полю связано с ухудшением качества электронного пучка, вызванного ростом поперечных скоростей электронов пучка при его формировании в области электронного диода, а сверху — циклотронным поглощением встречной волны. Расчеты, проведенные для нескольких положений резонансного рефлектора относительно ЗС генератора, показали, что при изменении длины участка дрейфа  $L_0$  происходит сдвиг частоты генерации, который составляет в среднем около 150 MHz/cm.



**Рис. 1.** Расчетная геометрия генератора с соленоидом (а) и полосовая характеристика ЗС (b).  $R$  — коэффициент отражения по мощности.

Для получения максимальной полосы перестройки по половинному уровню мощности при каждом  $L_0$  требуется некоторая подстройка по магнитному полю. Вероятно, это связано с изменением условий циклотронного поглощения встречной волны при смещении частоты генерации. Окончательно в расчетах был получен режим с полосой  $(F_{\max}/F_{\min} - 1) \cdot 100\% \approx 18\%$ , где  $F_{\max} = 4.0$  GHz и  $F_{\min} = 3.3$  GHz (рис. 2). Максимальная расчетная мощность генерации составила 4.5 GW на частоте 3.57 GHz при эффективности генератора около 32%.



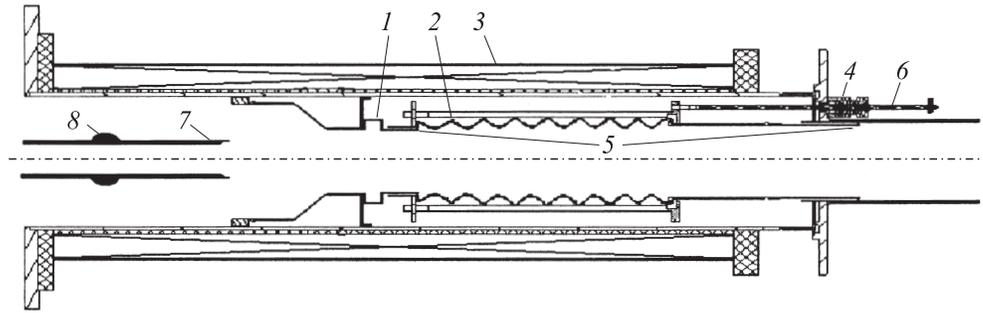
**Рис. 2.** Расчетные зависимости мощности ( $P$ ), частоты генерации ( $F$ ) и оптимального значения магнитного поля ( $B$ ) от длины участка дрейфа ( $L_0$ ).

В сравнении с работой [1] в численном моделировании было отмечено снижение длительности переходного процесса при приближении к верхней границе полосы перестройки. Таким образом, усиление неоднородности профиля ЗС, а также отражение части микроволновой мощности от выхода ЗС позволили в расчетах расширить полосу перестройки в сторону высоких частот до 4.0 GHz при сокращении длительности переходного процесса, а в сторону низких — до 3.3 GHz. Необходимо отметить, что в диапазоне частот 3.3–4 GHz в спектре присутствует паразитная компонента на частоте, приблизительно в 2 раза превышающей основную частоту генерации. Согласно дисперсионной характеристике ЗС, эта компонента может быть связана с возбуждением гибридной симметричной моды, лежащей в высшей полосе прозрачности в диапазоне 5.5–7.5 GHz. Интенсивная предварительная модуляция электронного потока по скорости в области рефлектора, вероятно, приводит к тому, что в спектре ВЧ-тока помимо основной присутствует значительная удвоенная спектральная компонента. Поскольку на вход ЗС генератора поступает уже промодулированный электронный поток, появляются условия для возбуждения этой паразитной моды. С повышением рабочей частоты генерации выше значения 3.4 GHz удвоенная частота выходит из соответствующей полосы пропускания ЗС и возбуждения этой моды не происходит.

## Экспериментальная часть

Эксперимент был выполнен с использованием импульсно-периодического наносекундного ускорителя электронов „СИНУС-7“ [5], который генерировал в однократном режиме электронный пучок с длительностью около 50 ns при напряжении на катоде  $\approx 1.2$  MV и токе диода  $\approx 15$  kA. Как было показано ранее [1], амплитуда тока пучка, поступающего в электродинамическую систему генератора, возрастала с увеличением магнитного поля и стабилизировалась при  $B \approx 0.4$  T на уровне 12 kA. Электродинамическая система генератора помещалась внутрь импульсного соленоида (рис. 3). Положения резонансного рефлектора 1 и анодного сужения были зафиксированы относительно катушек соленоида. Все гофры ЗС 2 плотно соединялись друг с другом с помощью шпилек. А с помощью штока 6, выведенного наружу через вакуумное уплотнение 4 в выходном фланце соленоида, осуществлялся сдвиг ЗС относительно рефлектора. Таким способом изменялась длина участка дрейфа  $L_0$  без напуска воздуха в вакуумный объем установки. Электрические контакты при сдвиге обеспечивались с помощью плунжеров 5. Катушка соленоида 3 была изготовлена из медной шинки. Для перехвата обратного тока электронов с внешней поверхности катододержателя и графитового катода 7 использовался охранный электрод 8.

СВЧ-излучение принималось коротким симметричным вибратором, передавалось по стабилизированному

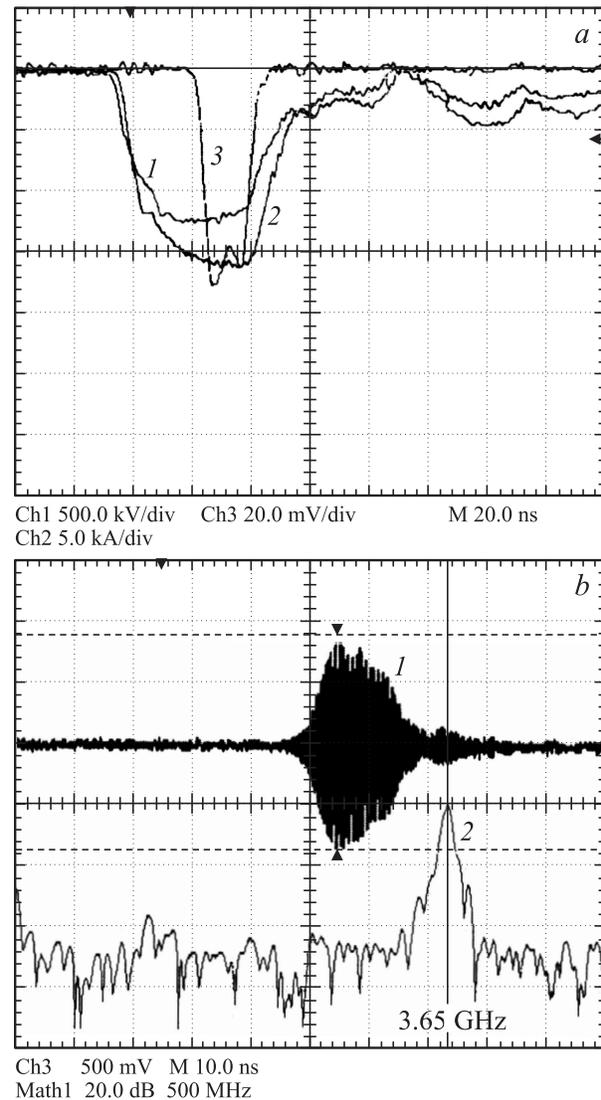


**Рис. 3.** Схематический рисунок генератора с магнитной системой: 1 — резонансный рефлектор, 2 — замедляющая система, 3 — катушки соленоида, 4 — вакуумное уплотнение для штока, 5 — плунжерные контакты, 6 — шток, 7 — катододержатель с графитовым катодом, 8 — охранный электрод.

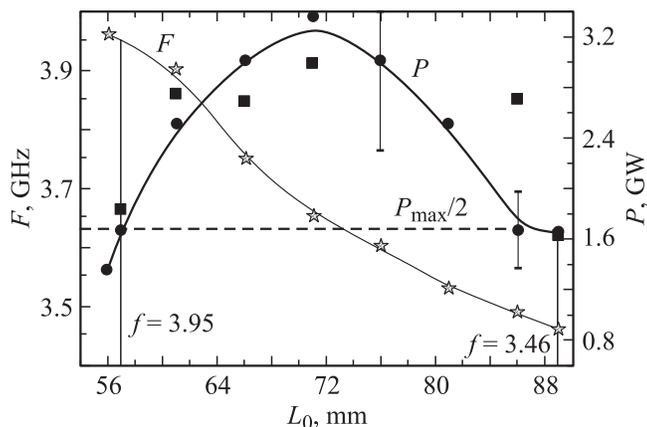
кабелю РК50-4-47, ослаблялось до необходимого уровня набором коаксиальных широкополосных аттенуаторов и одновременно регистрировалось непосредственно в виде радиосигнала и детектировалось коаксиальным полупроводниковым детектором. Спектр излучения определялся путем обработки радиосигнала осциллографом TDS-7404 с помощью его аппарата быстрого преобразования Фурье. При некоторых значениях  $L_0$  дополнительно контролировалась энергия импульсов СВЧ-излучения с помощью апертурного калориметра X-диапазона [6]. Полученные значения затем использовались для оценки мощности излучения. Необходимо отметить, что измерения с калориметром дают нижнюю оценку генерируемой мощности (часть мощности отражается от входного окна калориметра, часть проходит через калориметр).

Экспериментальная проверка генератора показала, что при изменении длины участка дрейфа  $L_0$  перестройка частоты осуществлялась в диапазоне 3.46–3.95 GHz. При этом подстройка ведущего магнитного поля выполнялась в пределах от 0.4 до 0.5 Т. При  $L_0 = 71$  mm (частота генерации 3.65 GHz) и магнитном поле  $B \approx 0.44$  Т была измерена диаграмма направленности излучения, которая соответствовала волне  $TM_{01}$ . Пиковая мощность СВЧ-излучения, полученная в результате интегрирования плотности потока мощности по данному распределению, составила  $3.4 \pm 0.7$  GW. Амплитудные значения напряжения на диоде и тока диода составляли 1.2 MV и 15 kA соответственно (рис. 4, *a*). Типичная осциллограмма радиосигнала и его спектр, полученные в данном режиме, представлены на рис. 4, *b*. В данном режиме эффективность прибора с учетом полного тока диода составила около 20%. Если при расчете эффективности учитывать только пришедший в ЗС ток пучка, то КПД генератора оценивается величиной 24%.

Дополнительно была измерена диаграмма направленности излучения при  $L_0 = 86$  mm (режим с частотой генерации 3.48 GHz). Интегрирование плотности потока мощности в этом случае дало значение пиковой мощности  $1.7 \pm 0.3$  GW. При других  $L_0$  оценка мощности излучения производилась следующим образом. Приемная антенна помещалась в максимум диаграммы направлен-



**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения в диоде (1), тока диода (2) и продетектированного СВЧ-сигнала с приемной антенны в максимуме диаграммы направленности СВЧ-излучения (3) — *a*; радиосигнал с приемной антенны (1) и его спектр (2) — *b*.



**Рис. 5.** Зависимость пиковой мощности и частоты генерации от длины участка дрейфа  $L_0$ . ■ — результат измерения с помощью калориметра, ● — результат антенных измерений.

ности излучения. С учетом частотной зависимости коэффициента передачи измерительного тракта измерялись значения пиковой плотности тока мощности излучения. Полученные значения затем нормировались на пиковую плотность потока мощности излучения, измеренную при  $L_0 = 71$  mm, и умножались на величину 3.4 GW. Таким образом, было показано, что в указанном выше диапазоне перестройки пиковая мощность излучения падала не более чем в 2 раза от ее максимального значения 3.4 GW, а значение полосы перестройки составляет около 14% (рис. 5).

Как видно из рис. 5, в случае  $L_0 = 86$  mm наблюдалось существенное расхождение между результатами антенных измерений и измерений мощности с помощью калориметра. Вероятно, это свидетельствует о присутствии в выходном излучении более высокочастотной компоненты, что отмечалось ранее и в численном моделировании. Данный высокочастотный паразитный сигнал находился вне полосы регистрации приемной антенны и осциллографа TDS-7404, а калориметр регистрировал суммарную энергию СВЧ-излучения.

При дальнейшем увеличении длины дрейфа  $L_0$  до 91 mm частота генерации оставалась практически постоянной вблизи значения 3.46 GHz, а сама генерация становилась нестабильной вплоть до ее полного исчезновения. Кроме того, в некоторых импульсах наблюдалась генерация на частоте 4.4 GHz. Визуальное наблюдение излучения с помощью панели из неоновых ламп показало, что это излучение соответствовало симметричной волне (наблюдалось светящееся кольцо). Анализ, проведенный с использованием дисперсионной характеристики ЗС генератора, показал, что его можно связать с симметричной волной  $TM_{02}$ . Дальнейшему расширению полосы перестройки в сторону низких частот, по-видимому, препятствует следующее обстоятельство. При уменьшении частоты генерации необходимо снижать ведущее магнитное поле (см. рис. 2). Однако при  $B < 0.4$  T токопрохождение пучка резко падает. Попытка

улучшения условий взрывной эмиссии, и соответственно снижения поперечных скоростей электронов в пучке за счет использования металлодиэлектрического катода (использование эффекта тройной точки), не дала результатов. По-видимому, это связано с большой длительностью фронта импульса ускоряющего напряжения ускорителя „СИНУС-7“ (около 12 ns), которая ограничивает рост числа эмиссионных центров на кромке катода вследствие эффекта экранировки.

## Заключение

Таким образом, за счет оптимизации геометрии электродинамической структуры РЛОВ-PP в эксперименте была расширена полоса механической перестройки частоты генерации с 12 до 14% (3.46–3.95 GHz) при фиксированных параметрах гофрировки и электронного пучка. Максимальная импульсная мощность генерации составила 3.4 GW на частоте 3.65 GHz при длительности около 16 ns.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ, проект № 08-08-00138a.

## Список литературы

- [1] Кицанов С.А., Коровин С.Д., Климов А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 15. С. 1–7.
- [2] Ростов В.В., Тотьменинов Е.М., Яландин М.И. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 11. С. 85–92.
- [3] Коровин С.Д., Куракин И.К., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [4] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [5] Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.
- [6] Klimov A.I., Vykhodtsev P.V., Elchaniniov A.A. et al. // Proc. 15<sup>th</sup> Int. Symp. High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2008. P. 422–424.