

10

## Импульсно-периодическая релятивистская лампа обратной волны с расширенной механической перестройкой частоты генерации

© А.И. Климов, И.К. Куркан, С.Д. Полевин,  
В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов

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

Поступило в Редакцию 26 апреля 2007 г.

Экспериментально реализован пакетный импульсно-периодический режим работы (1 с, 50 Hz) релятивистской лампы обратной волны (РЛОВ) с резонансным рефлектором и полосой механической перестройки частоты генерации от импульса к импульсу 9% по уровню — 3 dB от максимальной по диапазону перестройки пиковой СВЧ-мощности в магнитном поле 0.36 Т. Максимальная пиковая мощность генерации в пачке составила 2.5 GW на частоте 3.6 GHz при эффективности 20% и длительности СВЧ-импульса около 20 ns.

PACS: 84.30.Ng

Развитие релятивистских СВЧ-генераторов гигаваттного уровня выходной мощности может быть связано как с разработкой принципиально новых приборов, так и с расширением возможностей ранее предложенных устройств. С этой точки зрения представляется целесообразной попытка реализовать импульсно-периодический режим работы генератора с одновременной перестройкой частоты генерации от импульса к импульсу. Для расширения диапазона перестройки наиболее перспективным является использование механического способа, так как другая возможность смещения частоты генерации, связанная с электронной перестройкой, существенно ограничена малым изменением продольных скоростей электронов при изменении их кинетической энергии в релятивистской области. Ранее механическая перестройка частоты генерации в диапазоне 5–15% была экспериментально продемонстрирована в режиме однократных импульсов, например, для резонансной РЛОВ [1], резонансной релятивистской лампы бегущей волны (РЛБВ) с цепью

обратной связи [2] и 2-секционного виркатора [3]. Однако реализация импульсно-периодического режима работы данных генераторов с перестройкой рабочей частоты от импульса к импульсу требует решения сложных технических задач. К их числу, в частности, относятся: плавное изменение периода гофр резонансной РЛОВ, охлаждение соленоида, создающего сильное магнитное поле для транспортировки электронного пучка, и коллектора для высадки пучка с высокой средней мощностью (резонансные РЛОВ и РЛБВ), увеличение ресурса работы анодной сетки виркатора.

Проведенное ранее экспериментальное исследование схемы РЛОВ с резонансным рефлектором продемонстрировало возможность реализации полосы механической перестройки частоты генерации  $\approx 12\%$  в режиме однократных импульсов для фиксированных параметров электронного пучка и замедляющей системы (ЗС) [4,5]. При этом смещение рабочей частоты происходило только за счет механического изменения длины участка дрейфа между рефлектором и входом в ЗС, что обуславливало простоту данного способа перестройки. Следует отметить, что данный режим был реализован в слабых магнитных полях (ниже области циклотронного поглощения встречной волны). Для импульсно-периодического режима работы генератора это является весьма существенным, поскольку позволяет исключить необходимость применения системы охлаждения катушек соленоида и снизить энергетические затраты на создание квазипостоянного (длительностью около 1 с) магнитного поля. Кроме того, использование слабых магнитных полей отчасти облегчает проблему охлаждения коллектора за счет увеличения площади высадки электронного пучка (с уменьшением магнитного поля возрастает толщина пучка).

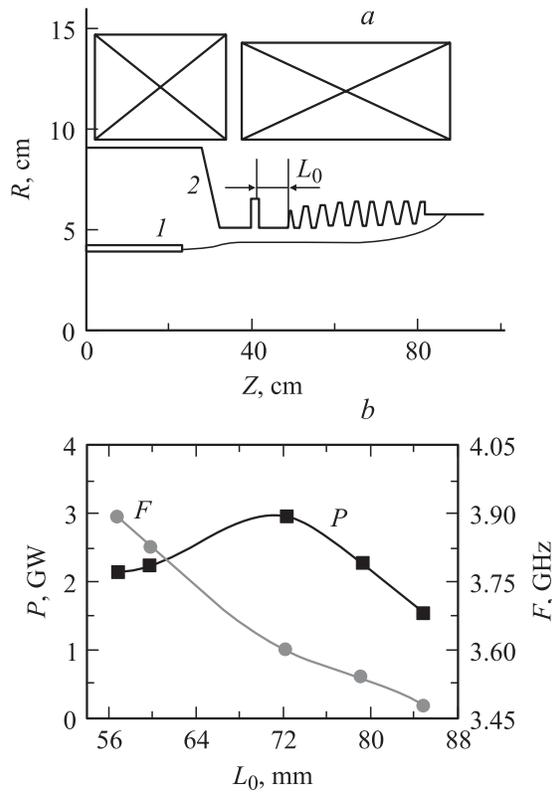
Таким образом, нами были созданы предпосылки реализации импульсно-периодического режима работы генератора с одновременной перестройкой частоты генерации от импульса к импульсу в диапазоне около 10%.

Для проведения численного моделирования был использован PIC-код KARAT [6]. Проводилась оптимизация параметров электронного пучка, геометрии электродинамической системы генератора и индукции ведущего магнитного поля. Также была оптимизирована конфигурация (геометрические размеры, количество витков катушки) двухсекционной магнитной системы постоянного тока, обеспечивающая декомпрессию электронного пучка, формируемого в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией и его транспортировку вдоль пространства

взаимодействия. Расчетное магнитное поле на кромке катода приблизительно в 1.2 раза превышало соответствующее значение в области расположения резонансного рефлектора и ЗС. В условиях эксперимента усиленное поле на катоде способствует более равномерной эмиссии электронов за счет уменьшения эффекта взаимной экранировки взрывоэмиссионных центров [7] и, тем самым, повышению азимутальной однородности пучка и уменьшению разброса продольных скоростей электронов.

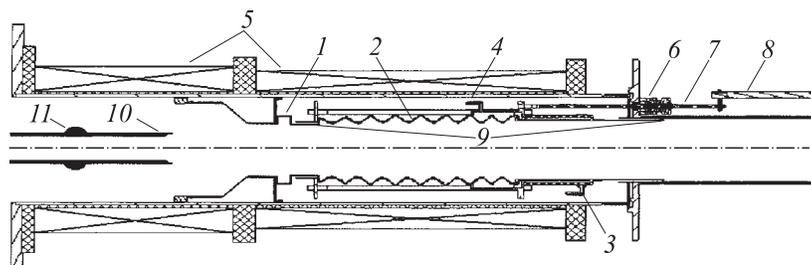
Для оптимальных значений напряжения на катоде 1 MV, тока электронного пучка 10 kA и магнитного поля в области расположения ЗС и рефлектора 0.3 T (ток соленоида 120 A) расчетная полоса перестройки частоты по уровню — 3 dB от максимальной мощности 2.9 GW (рис. 1) составила  $\approx 11\%$  (3.48–3.89 GHz). Следует отметить, что эффективная генерация имела место в диапазоне магнитных полей в области ЗС и рефлектора 0.29–0.34 T.

Общий вид генератора с магнитной системой представлен на рис. 2. Электродинамическая система генератора помещалась внутрь двухсекционного соленоида квазипостоянного тока. Положение резонансного рефлектора и анодного сужения было зафиксировано относительно катушек соленоида. Сдвиг ЗС обеспечивался внешним устройством САР32, которое механически соединялось с ней через шток 7, заходящий внутрь вакуумного объема через уплотнение 6 в торцевом фланце соленоида. Это позволяло изменять длину участка дрейфа между резонансным рефлектором и ЗС. Электрические контакты при сдвиге обеспечивались с помощью плунжеров 9. Для водяного охлаждения мест высадки электронного пучка коллектор и две последние гофры генератора (пучок частично высыпался на них) были соединены друг с другом герметично с помощью сварки. Остальные гофры плотно притягивались к ним с помощью шпилек. Входная и выходная части системы охлаждения были вакуумно-плотно соединены через выходной торцевой фланец соленоида с внешней системой циркуляции воды армированными полиэтиленовыми шлангами. Катушки соленоида были изготовлены из медной шинки и затем соединены последовательно. Питание соленоида осуществлялось от источника, обеспечивающего стабилизацию выходного тока в пределах не более  $\pm 5\%$  в течение 1 s. Ток соленоида мог устанавливаться в пределах 30–180 A, что соответствовало магнитному полю внутри замедляющей системы 0.07–0.42 T. Для отвода тепла использовалось воздушное охлаждение.



**Рис. 1.** Расчетная геометрия генератора и двухсекционного соленоида (а) и результаты численного моделирования (b): 1 — катод, 2 — анодное сужение,  $P$ ,  $F$  — зависимости мощности и частоты генерации от длины участка дрейфа  $L_0$  соответственно. Относительная полоса перестройки определяется выражением:  $((F_{\max} - F_{\min})/F_{\text{mid}}) \cdot 100\%$ , где  $F_{\max}$  и  $F_{\min}$  — соответственно максимальная и минимальная частота диапазона,  $F_{\text{mid}} = (F_{\max} + F_{\min})/2$ .

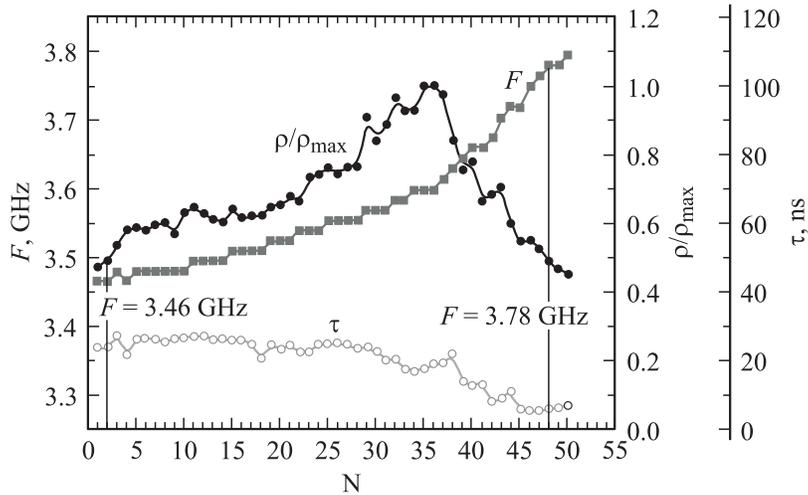
Эксперимент был выполнен с использованием сильноточного импульсно-периодического ускорителя электронов „СИНУС-7“ [8], который работал с частотой повторения до 50 Hz. Длительность импульса напряжения составляла около 50 ns. Электронный пучок эмитировался графитовым катодом. СВЧ-сигнал принимался антенной в виде коротко-



**Рис. 2.** Схематический рисунок генератора с магнитной системой: 1 — резонансный рефлектор, 2 — замедляющая система, 3 — вход водяного охлаждения, 4 — выход водяного охлаждения, 5 — катушки соленоида, 6 — вакуумное уплотнение для штока, 7 — шток, 8 — тяга-толкатель передвигающего устройства САР32, 9 — плунжерные контакты, 10 — катододержатель с гарфитовым катодом, 11 — охранный электрод.

го электрического вибратора, которая была расположена на расстоянии 4 м от передающей рупорной антенны. Далее сигнал передавался по калиброванному стабилизированному кабелю РК50-4-47 в экранированную комнату, где ослаблялся с помощью набора калиброванных коаксиальных аттенуаторов фирмы RADIALL. Затем сигнал детектировался с помощью коаксиального детектора на диоде Д604 и регистрировался осциллографом TDS 5104В. Длительность продетектированного сигнала определялась этим осциллографом автоматически по уровню 0.6 от его пикового значения, что соответствовало длительности СВЧ-мощности по уровню 0.5. Погрешности измерения эффективной поверхности антенны и калибровки детектора составляли  $\pm 20$  и  $\pm 10\%$  соответственно. Частота генерации измерялась с помощью осциллографа TDS 7404 с использованием встроенной функции быстрого преобразования Фурье. При частоте повторения 50 Hz оба осциллографа работали в режиме накопления сигналов.

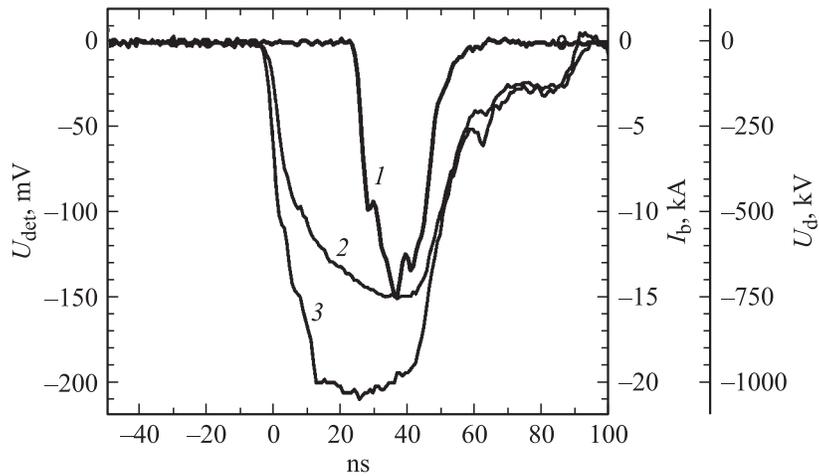
Предварительно генератор был исследован в режиме одиночных импульсов для определения оптимальных значения тока диода  $\approx 15$  кА, напряжения на диоде  $\approx 1.05$  МВ и тока соленоида  $\approx 150$  А с целью достижения максимально близких к расчетным значений полосы перестройки частоты генерации и максимальной пиковой мощности СВЧ-излучения при устойчивой генерации на рабочей волне  $E_{01}$ . Измерения с помощью токового шунта показали, что ток пучка, проходящего



**Рис. 3.** Зависимости нормированной на максимальное значение пиковой плотности потока мощности излучения ( $\rho/\rho_{\max}$ ), частоты генерации ( $F$ ) и длительности СВЧ-сигнала ( $\tau$ ) от номера импульса в пачке ( $N$ ).

через ЗС, нарастает с увеличением магнитного поля и стабилизируется на уровне  $\approx 11.5$  кА при токе соленоида не менее 145 А. Существенные потери тока в вакуумном диоде (около 3.5 кА) были, по-видимому, обусловлены наличием паразитных обратных электронных потоков с достаточно большой поверхности катододержателя, которые не полностью перехватывались охранным электродом (рис. 2).

В импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 50 Hz параметры электронного пучка стабилизировались до необходимых оптимальных значений после первых 4–5 импульсов пачки, длительность которой составляла 1 с. За такое время передвигающее устройство изменяло длину участка дрейфа  $L_0$  на 22 мм. При этом регистрируемая антенной пиковая плотность потока мощности излучения ( $\rho = P/S_{eff}$ , где  $P$  — мощность, принимаемая антенной,  $S_{eff}$  — ее эффективная поверхность) изменялась от импульса к импульсу не более чем в 2 раза в диапазоне 3.46–3.78 GHz при токе соленоида  $\approx 150$  А (рис. 3). Для импульсов № 45... 50 пачки наблюдалась двугорбая форма протектированных сигналов с минимумом между горбами ниже уровня 0.6.



**Рис. 4.** Осциллограммы протектированного СВЧ-сигнала с приемной антенны (1), расположенной в максимуме диаграммы направленности излучения, тока диода (2) и напряжения на диоде (3).

Это может объясняться тем, что при продольном смещении ЗС генератора возникало такое взаимное расположение электронного потока и замедляющей системы, при котором, вследствие дополнительной накачки поперечных скоростей электронов радиальной компонентой электрического поля синхронной волны, происходило выбрасывание их заметной части на поверхность гофр, расположенных в начале ЗС.

При фиксированной длине участка дрейфа  $L_0 \approx 66$  mm, которая соответствовала импульсу ускорителя № 35 с максимальной плотностью потока мощности излучения и частоте  $\approx 3.6$  GHz (рис. 4), была измерена диаграмма направленности излучения. Интегрирование плотности потока мощности по диаграмме дало значение пиковой мощности генерации  $2.5 \pm 0.6$  GW. С учетом тока пучка, инжектированного в ЗС, эффективность генератора по мощности составила  $20 \pm 4\%$ . Диаграмма направленности излучения соответствовала волне  $E_{01}$ . При данном положении рефлектора относительно ЗС был реализован односекундный импульсно-периодический режим работы генератора с частотой повторения 50 Hz. В пределах пачки стандартное отклонение пиковых значений протектированных микроволновых импульсов относительно

их среднего значения не превышало  $\pm 3\%$  при длительности СВЧ-импульса около 20 ns.

Таким образом, в эксперименте получен односекундный импульсно-периодический (50 Hz) режим генерации РЛОВ гигаваттного уровня мощности с полосой механической перестройки частоты генерации от импульса к импульсу  $\approx 9\%$ . Наблюдаемое некоторое различие между расчетными и экспериментальными результатами, по-видимому, связано со спецификой формирования электронного пучка в низких магнитных полях  $\sim 0.4$  Т. При таких полях существенную роль может играть достаточно большая длительность фронта импульса напряжения ускорителя ( $\approx 12$  ns), которая приводит к ограничению числа эмиссионных центров на катодной кромке [7]. Основные пути, направленные на повышение стабильности генерации и расширение полосы перестройки частоты в эксперименте, могут быть связаны как с повышением качества электронного пучка в слабых магнитных полях за счет увеличения декомпрессии и применения других материалов для изготовления катода, так и с переходом в область сильных магнитных полей.

Авторы выражают благодарность С.А. Кицанову и М.Ю. Сухову за помощь в проведении экспериментальной части работы.

## Список литературы

- [1] *Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 87–94.
- [2] *Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Савельев А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 4. С. 14–18.
- [3] *Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д.* и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 5. С. 82–90.
- [4] *Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [5] *Кицанов С.А., Коровин С.Д., Климов А.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 15. С. 1–7.
- [6] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [7] *Бугаев С.П., Ильин В.И., Кошелев В.И.* и др. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 5–75.
- [8] *Коровин С.Д., Ростов В.В.* // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.