

02;09;10

Мультигигаваттная релятивистская лампа обратной волны сантиметрового диапазона с модулирующим резонансным рефлектором

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

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

Поступило в Редакцию 27 апреля 2007 г.

Экспериментально реализован эффективный режим генерации с высокой импульсной мощностью излучения релятивистской лампы обратной волны (РЛОВ) с резонансным рефлектором. Средний диаметр замедляющей структуры в 1.6 раза превышал длину волны излучения. Максимальная пиковая мощность генерации составила 4.3 GW на частоте 9.4 GHz при эффективности 31% и длительности СВЧ-импульса около 22 ns для ведущего магнитного поля 4.5 T.

PACS: 07.57.Hm.

Известно [1,2], что повышению мощности и энергии импульсов излучения релятивистской лампы обратной волны (РЛОВ) препятствует возникновение взрывной электронной эмиссии на поверхности замедляющей системы (ЗС) под действием ВЧ-полей с напряженностью $\sim 10^6$ V/cm. При этом может происходить срыв генерации и ограничение длительности микроволновых импульсов на уровне единиц наносекунд. В трехсантиметровом диапазоне длин волн максимальная пиковая мощность генерации около 3 GW при эффективности по мощности $\approx 20\%$ была получена в эксперименте [3] с использованием традиционной схемы РЛОВ с запредельным сужением и средним диаметром ЗС $\approx 0.9\lambda$ (λ — длина волны излучения). Как показывают оценки, с учетом стоячей волны максимальная напряженность ВЧ электрического поля на поверхности гофрировки составляла около 2.5 MV/cm. При этом для увеличения длительности СВЧ-импульса с 6 до 30 ns применялась специальная обработка поверхности ЗС для

повышения ее электрической прочности. Необходимо отметить, что даже в этом случае по мере длительной наработки происходило постепенное ухудшение электропрочности ЗС и соответственно укорочение длительности микроволнового импульса. Другая возможность снижения напряженности ВЧ электрического поля на поверхности гофрировки, связанная с увеличением среднего диаметра ЗС ($D/\lambda > 1$, где D — средний диаметр ЗС), ограничивалась возбуждением конкурирующих колебаний.

Проведенное ранее теоретическое и экспериментальное исследование схемы РЛОВ с резонансным рефлектором продемонстрировало возможность селективного возбуждения рабочей волны при уровне сверхразмерности ЗС $D/\lambda \approx 1.5$ [4–6]. В данной конструкции генератора наличие предварительной модуляции электронного пучка в области рефлектора обеспечивает снижение стартового тока генератора для рабочей волны E_{01} и создает необходимое условие для селекции волн. Кроме того, было показано [5], что наличие эффективной предварительной модуляции частиц по энергии превращает данный прибор в аналог твистрона, для которого максимальное теоретическое значение эффективности достигает 60% [7].

Оптимизация геометрии генератора и параметров электронного пучка в численном моделировании производилась методом крупных частиц (программа „KARAT“ [8]). Окончательно в расчетах использовался электронный пучок с током 18 кА, ускоряемый импульсным напряжением с амплитудой 850 кВ, который транспортировался вдоль электродинамической системы генератора ведущим продольным магнитным полем 5 Т. Средний диаметр ЗС в 1.6 раза превышал длину волны излучения. Для предотвращения возбуждения конкурирующих колебаний использовалась неоднородная по амплитуде ($l = 0.95–1.95$ мм) и периоду ($d = 15.2–14.1$ мм) гофрировки ЗС. Оптимальному режиму генерации соответствовало положение резонансного рефлектора относительно ЗС $L_0 = 23.5$ мм (рис. 1). Максимальная расчетная эффективность генератора равнялась 37% при установившемся уровне мощности 5.7 ГВт (рис. 2) на частоте ≈ 9.2 ГГц. При увеличении L_0 мощность и соответственно эффективность генерации снижались, а время выхода в стационарный режим сокращалось. Смещение рефлектора в обратном направлении приводило к существенному возрастанию времени переходного процесса и некоторому снижению мощности генерации. При этом на этапе переходного процесса наблюдалось возбуждение конку-

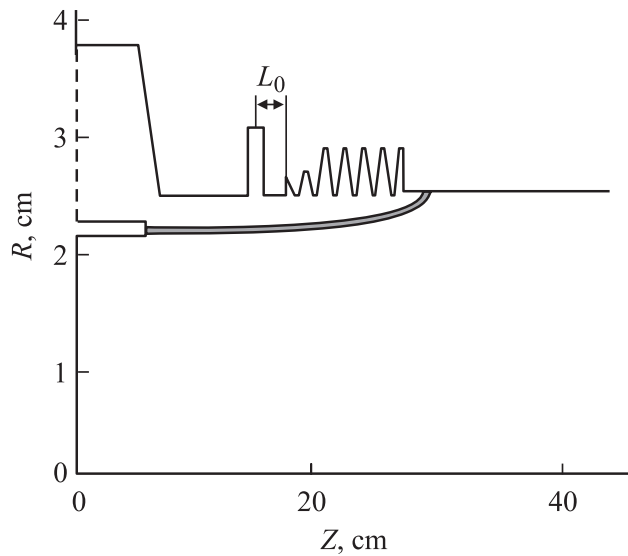


Рис. 1. Схема РЛОВ с резонансным рефлектором.

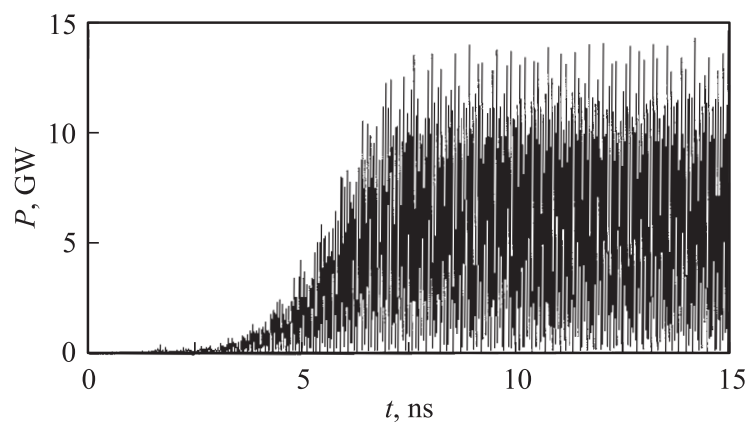


Рис. 2. Неусредненный по времени поток мощности на выходе из области расчета.

рирующего колебания с частотой около 11 GHz, которую для данных параметров гофрировки можно сопоставить с резонансным колебанием ЗС вблизи π -вида моды E_{01} . Оценка максимальной напряженности ВЧ электрического поля на поверхности гофрировки проводилась с помощью программы на основе метода матриц рассеяния [9]. Для расчетной мощности генерации 5.7 GW данное значение составляет около 2.5 MV/cm.

Эксперимент был выполнен с использованием сильноточного наносекундного ускорителя электронов „СИНУС-7“ [10], который работал в режиме однократных импульсов. Длительность импульса напряжения составляла около 50 ns. Электронный пучок эмиттировался графитовым катодом диаметром 44 mm. Все элементы электродинамической системы генератора были выполнены из нержавеющей стали и соединялись между собой с помощью стягивающих шпилек. Для регистрации СВЧ-сигналов использовалась приемная антенна в виде открытого конца прямоугольного волновода с геометрическим сечением 23×10 mm и поглотителями на внешней части для уменьшения эффективного сечения антенны и снижения его частотной зависимости. Погрешность измерения эффективного сечения составляла $\pm 13\%$. Приемная антенна была расположена на расстоянии 4.5 m от излучающего рупора и для повышения ее электрической прочности пространство внутри нее и около входа было заполнено газом SF₆ (пространство около апертуры излучающего рупора также заполнялось газом SF₆). Микроволновый сигнал детектировался ламповым детектором, который был соединен с приемной антенной через направленный ответвитель с переходным затуханием около 19 dB, и регистрировался осциллографом TDS 754C. Погрешность калибровки детектора составляла $\pm 15\%$. Измерение энергии в СВЧ-импульсе проводилось с использованием апертурного калориметра, который располагался непосредственно перед излучающим рупором и полностью перекрывал его апертуру (пространство между излучающим рупором и калориметром заполнялось газом SF₆). При этом длительность СВЧ-сигнала контролировалась с помощью приемной антенны, расположенной непосредственно за калориметром (часть мощности проходила через него). Для измерения спектра генерации использовался гетеродинный измеритель частоты и осциллограф TDS 7404, где сигнал промежуточной частоты обрабатывался с помощью встроенной в него функции быстрого преобразования Фурье.

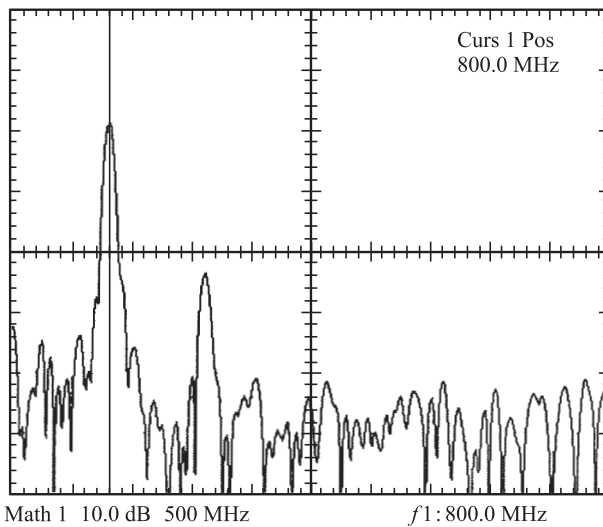


Рис. 3. Спектр сигнала промежуточной частоты (масштаб по вертикали — 10 dB/div, по горизонтали — 500 MHz/div). Частота генерации: $F = F_{get} - \Delta F$, где $F_{get} \approx 10.2$ GHz — частота гетеродина, $\Delta F \approx 800$ MHz — промежуточная частота. Рисунок представляет собой изображение, снятое с экрана осциллографа.

При оптимальных параметрах электронного пучка: напряжении на диоде ≈ 950 kV и токе диода ≈ 14.7 kA, положении рефлектора относительно ЗС $L_0 \approx 23.5$ mm и магнитном поле 4.5 T — был получен устойчивый режим генерации на частоте ≈ 9.4 GHz (рис. 3). Микроволновая мощность, измеренная путем интегрирования диаграммы направленности излучения (соответствовала волне E_{01}), составила 4.3 ± 1.1 GW при эффективности генератора по мощности $31 \pm 8\%$. Длительность СВЧ-импульсов на половинном уровне от максимальной амплитуды составляла около 22 ns (рис. 4). В данном режиме стандартное отклонение пиковых значений микроволновых импульсов относительно их среднего значения не превышало $\pm 2\%$. Измеренная апертурным калориметром энергия в микроволновом импульсе составила около 70 J. С учетом коэффициента формы СВЧ-импульса это соответствует пиковой мощности генерации ≈ 3.4 GW.

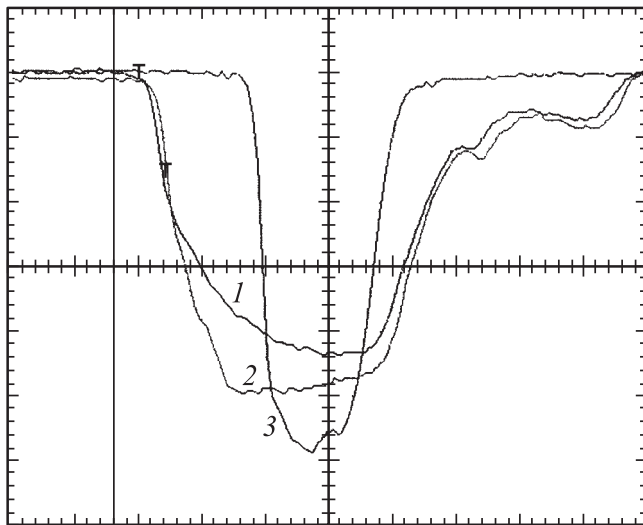


Рис. 4. Осциллограммы импульсов (развертка — 12.5 ns/div): 1 — ток диода (3.43 kA/div), 2 — напряжение на диоде (195 V/div), 3 — сигнал с лампового детектора (200 mV/div).

Увеличение мощности электронного пучка на 60% приводило к росту мощности генерации до ≈ 5 GW при одновременном снижении эффективности генератора до $\approx 22\%$. При этом длительность СВЧ-сигналов уменьшалась незначительно до ≈ 20 ns. Измеренная апертурным калориметром энергия в микроволновом импульсе составила около 80 J, что соответствовало пиковой мощности ≈ 4.4 GW.

Таким образом, в эксперименте реализован режим генерации РЛОВ с эффективностью около 31%, пиковой мощностью ≈ 4.3 GW и длительностью микроволновых импульсов около 22 ns без применения специальных методов повышения электрической прочности ЗС. Увеличение мощности генерации до 5 GW не приводило к существенному укорочению длительности импульсов. Дальнейший рост мощности и энергии выходного излучения РЛОВ может быть связан как с применением обработки поверхности ЗС, так и с увеличением среднего диаметра ЗС при сохранении селективных свойств генератора.

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

Работа была выполнена при поддержке РФФИ, проект № 06-08-00063а.

Список литературы

- [1] *Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 19. С. 1168–1171.
- [2] *Коровин С.Д., Месяц Г.А., Пегель И.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 6. С. 27–36.
- [3] *Батраков А.В., Карлик К.В., Кицанов С.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 4. С. 39–46.
- [4] *Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 10. С. 43–47.
- [5] *Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [6] *Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотменинов Е.М.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 17–23.
- [7] *Ковалёв Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д.* и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 76.
- [8] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [9] *Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V.* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. N 4. P. 745–752.
- [10] *Коровин С.Д., Ростов В.В.* // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.