

09;10

## **Высокоэффективная генерация импульсов субнаносекундной длительности в релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона длин волн**

© С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов, М.Р. Ульмаскулов,  
К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: yalandin@ief.uran.ru

*Поступило в Редакцию 13 августа 2001 г.*

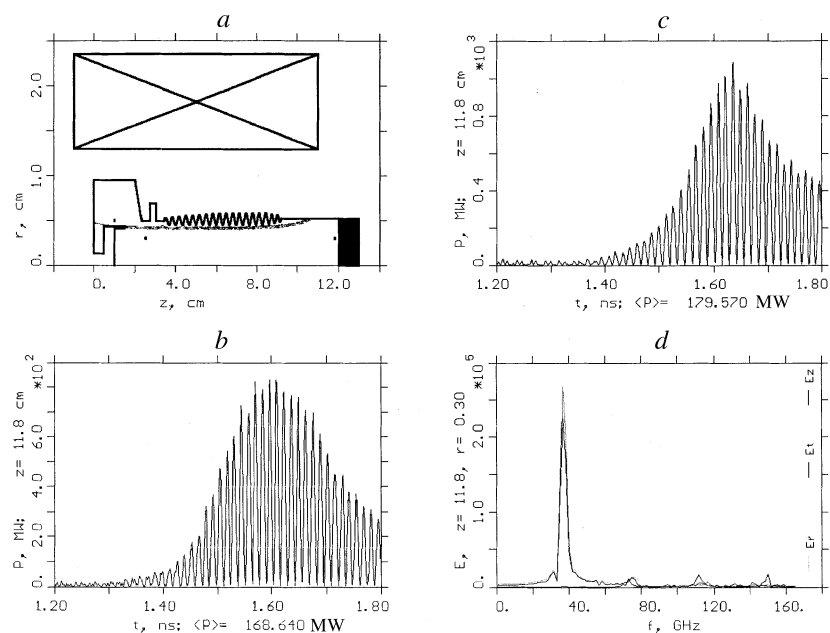
Представлены результаты исследований режима нестационарной генерации с коротким всплеском мощности, который характерен для начальной стадии переходного процесса в лампе обратной волны (ЛОВ) при существенном превышении тока пучка над стартовым. В результате численных расчетов найдены условия, при которых эффективность передачи мощности из электронного пучка с параметрами 300 keV, 2 kA, 1 ns в микроволновый импульс длительностью 8–10 периодов высокочастотного поля приближается к 90%. В экспериментах показана возможность генерирования подобных импульсов с длительностью 200–250 ps, мощностью до  $\sim 400$  MW и центральной частотой около 38 GHz.

1. На возможность получения с помощью релятивистской ЛОВ резкого начального всплеска мощности, в несколько раз превышающего уровень стационарной генерации, впервые было обращено внимание в работе [1]. Несмотря на то что такой режим генерации был экспериментально осуществлен и получены относительно высокие пиковые мощности порядка 100–200 MW в диапазонах длин волн 8 mm [2–5] и 3 cm [6], далеко не все ресурсы повышения электронного к.п.д. были исчерпаны. Для использованной ранее традиционной схемы релятивистской ЛОВ, содержащей гофрированную замедляющую систему (ЗС), в которой отражение излучения со стороны катода обеспечивается отрезком запредельного волновода, основные ограничения мощности в первом пике были подобны ограничениям мощности в стационарном режиме. Одна из наиболее важных причин, по-видимому, связана с вли-

янием пространственного заряда на эффективность генерации. Другим фактором, ограничивающим мощность в электромагнитном импульсе с конечной шириной спектра ( $\sim 10\%$ ), служит дисперсия волнового пакета в ЗС.

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования и экспериментов по исследованию ЛОВ с повышенным поперечным размером ЗС и полосовым рефлектором для вывода излучения [7]. Такая схема ЛОВ облегчает не только решение перечисленных выше проблем, но и открывает перспективы получения высокой эффективности генерации электромагнитных импульсов при пониженных значениях транспортирующего магнитного поля, когда  $\omega_b \leq \omega$ , где  $\omega_b$  — циклотронная частота, а  $\omega$  — круговая частота волны. Задача снижения магнитного поля является принципиальной при реализации импульсно-периодического режима работы генератора. В частности, частота следования импульсов ЛОВ на основе гибридного высоковольтного модулятора [8] может быть  $10^3$  Hz и выше.

2. Геометрия ЗС была разработана для возбуждения ЛОВ на центральной частоте 38 GHz с помощью предварительных расчетов по одномерной нестационарной модели [1] и с учетом ряда экспериментальных данных [3–7]. Последующая оптимизация геометрии производилась в полномасштабном численном эксперименте методом крупных частиц (программа КАРАТ [9]). Полная длина ЗС, схема которой представлена на рис. 1, включала 18 периодов гофрировки. Из них первые девять гофр имели плавно нарастающую амплитуду, затем следовала однородная секция со средним диаметром 11.2 mm (6 периодов) и выходной участок (3 периода) с уменьшающимися амплитудой и периодом гофрировки, обеспечивающий широкополосное согласование с круглым волноводом. Геометрия сосредоточенного рефлектора в виде глубокой канавки выбиралась такой, чтобы дифракционная добротность запертого колебания  $E_{021}$  была предельно низкой ( $\sim 3$ ). Электродинамический расчет свойств рефлектора проводился несколькими способами. Полосовые характеристики рефлектора находились с помощью метода матриц рассеяния. Коэффициент отражения по мощности был не менее 0.9 в полосе частот 16%. Отражение волнового пакета с длительностью на полувысоте  $\sim 200$  ps моделировалось с помощью кода КАРАТ. В этом случае было получено, что доля прошедшей через полосовой фильтр энергии не превышала 2%.



**Рис. 1.** Результаты численного моделирования субнаносекундной релятивистской ЛОВ: *a* — геометрия электронного инжектора и замедляющей системы; *b, c* — не усредненный поток мощности СВЧ-импульсов при использовании транспортирующего магнитного поля 2 и 5.5 Т соответственно; *d* — типичный спектр субнаносекундного СВЧ-импульса.

В расчете микроволнового генератора использовалась самосогласованная модель электронного вакуумного диода. На катод подавались ускоряющие импульсы в форме трапеции с фронтом и спадом 150 ps и плоским участком длительностью 1 ns. Такая форма импульса была близкой к реализованной в описываемых ниже экспериментах. Рис. 1, *b, c* иллюстрирует неусредненный по времени поток мощности в контрольном сечении на выходе ЗС после коллектора пучка при двух значениях внешнего магнитного поля. В численном эксперименте производился выбор положения рефлектора относительно ЗС, ее длины, а также профиля неоднородного распределения сопротивления связи

пучка с синхронной пространственной гармоникой. Было отмечено, что в зависимости от положения рефлектора мощность первого пика излучения менялась в значительно меньшей степени (20–30%), чем это имело место для случаев стационарной генерации [6,10]. Этот факт объясняется тем, что в течение короткого интервала времени, когда формируется максимальная амплитуда волны, значение поля в области рефлектора еще не достигает наибольшего значения, и он не успевает в полной мере выполнить функцию модулирующего зазора. Тем не менее эффект модуляции был замечен и в большей степени влиял на длительность формируемого импульса. Следует отметить также, что только за счет вполне умеренного профилирования коэффициента связи на входе ЗС удается увеличить пиковую мощность в расчетах примерно в 1.3–1.4 раза. Таким образом, в численном моделировании эффективность передачи мощности пучка в мощность микроволнового импульса (8–10 периодов поля на полувысоте) была доведена приблизительно до 85% в сильном магнитном поле (5.5 Т) и примерно до 65% в области  $B \cong 2$  Т (рис. 1, *b, c*).

Оптимальная геометрия использованных в численном моделировании электронного инжектора, фокусирующего соленоида и ЗС СВЧ генератора была воспроизведена в экспериментальной установке. Заменяющая система представляла конструкцию из меди, изготовленную методом гальванопластики с точностью 20  $\mu\text{m}$ .

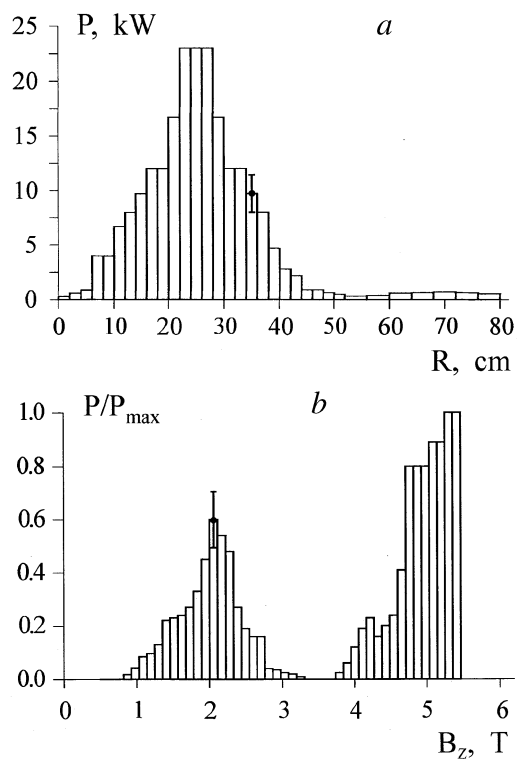
3. Эксперименты выполнялись с использованием сильноточного субнаносекундного электронного ускорителя [11]. Он представлял собой малогабаритный 5-ns высоковольтный генератор РАДАН-303БП [12], дополнительный индуктивно-емкостный блок компрессии и обострения импульсов напряжения с азотными разрядниками высокого давления [13], трансформирующую коаксиальную линию и электронный вакуумный коаксиальный диод с магнитной изоляцией на основе трубчатого взрывоэмиссионного графитового катода и импульсного соленоида с максимальной индукцией до 5.5 Т. Ускоритель генерировал тонкостенный трубчатый пучок диаметром 8.6 мм с длительностью на полувысоте 1.2 ns, током до 2.2 кА и энергией электронов в дрейфовом пространстве до 310 keV. Энергия и ток пучка могли варьироваться при перестройке напряжения на катоде и величины ускоряющего зазора. В экспериментах эти характеристики поддерживались на уровне 290 keV и 2.1 кА с полным разбросом не хуже 5%, что соответствовало мощности пучка  $\sim 600$  MW.

Ускоряющие импульсы контролировались с помощью калиброванного емкостного делителя (переходная характеристика  $< 120$  ps). В ходе экспериментов для мониторинга амплитуды импульсов ускоряющего напряжения применялся цифровой осциллограф Tektronix TDS-684B (аналоговая полоса регистрации 1 GHz). Датчик тока пучка в виде цилиндра Фарадея был смонтирован на торце коаксиальной линии ( $\sim 3 \Omega$ ), согласованной на выходе с измерительным полосковым делителем напряжения. При измерениях датчик устанавливался в дрейфовой камере генератора вместо ЗС.

СВЧ-импульсы регистрировались неохлаждаемым германиевым детектором на горячих носителях, прокалиброванным с помощью магнетронного генератора. Ранее с помощью такого детектора наблюдались импульсы с фронтами вплоть до 75–100 ps [3]. Сигнал детектора регистрировался осциллографом C7-19 (с полосой 5 GHz), развертка которого была прокалибрована с точностью не хуже 5% тестовыми импульсами с фронтом 90 ps. В качестве линии задержки (ЛЗ) осциллографа использовался широкополосный кабель с пористой фторопластовой изоляцией.

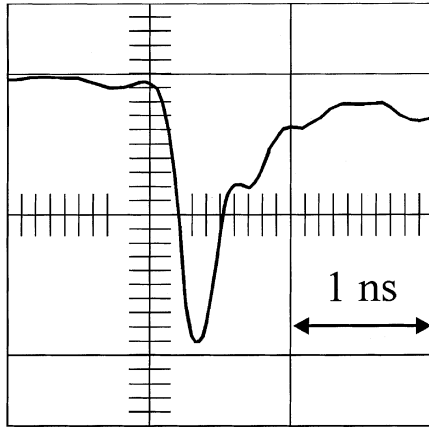
Калибровка коэффициентов амплитудного ослабления кабельных трактов СВЧ-детектора и ЛЗ, а также определение степени уширения субнаносекундных сигналов при прохождении этих трактов выполнялись набором тестовых импульсов (амплитуда  $\sim 1$  V) с фронтами 100–200 ps и длительностями на полувывоте 150–300 ps. Для калибровочных измерений трактов использовался цифровой стробоскопический осциллограф Tektronix TDS-820 с полосой регистрации 6 GHz. Типичная точность измерения упомянутых калибровочных параметров была не хуже 3–5%.

4. В экспериментах импульсная мощность СВЧ-генератора определялась интегрированием показаний детектора по диаграмме направленности, сканируемой в горизонтальной плоскости на расстоянии 2 m от излучающей рупорной антенны. Диаграмма направленности излучения была симметричной и соответствовала волне  $E_{01}$  (рис. 2, *a*). При обработке осциллограмм учитывалась нелинейность чувствительности детектора. Диапазон малых амплитуд сигнала, где нелинейность детектора была незначительной, соответствовал участкам диаграммы направленности с принимаемыми мощностями до 5 kW. В этом случае искажение формы огибающей СВЧ-импульса было несущественным и регистрируемый импульс имел длительность на полувывоте в  $\sim 200$ –250 ps. При



**Рис. 2.** *a* — диаграмма направленности волны  $E_{01}$ , полученная в детекторных измерениях; *b* — зависимость мощности генерации ЛОВ от транспортирующего магнитного поля.

положении приемной антенны вблизи максимума главного интерференционного кольца волны  $E_{01}$  детектор работал в нелинейной области калибровки, в связи с чем регистрируемый осциллографом импульс уширялся до 300–350 ps (рис. 3). Подобная трансформация длительности импульса требовала варьировать коэффициент ослабления кабельных трактов и ЛЗ при расчете реальной мощности, принимаемой детектором, поскольку возможное завышение длительности импульса могло приводить к ошибке при измерении мощности на периферии главного



**Рис. 3.** Типичный импульс, регистрируемый на экране осциллографа С7-19 с германиевого СВЧ-детектора, расположенного вблизи максимума диаграммы направленности.

интерференционного кольца. Полагая погрешность осциллографического измерения длительности СВЧ-импульса на полувысоте, равной 50 ns, расчет суммарной мощности СВЧ-генератора приводит к значениям в диапазоне 240–280 MW, которые следуют из непосредственного интегрирования диаграммы направленности, полученной при индукции транспортирующего поля 2 Т (рис. 2, *a*). Следует отметить, что в случае выборки серии импульсов при полном разбросе амплитуд ускоряющего напряжения до 5% среднеквадратичный разброс измеряемой детектором СВЧ-мощности не превышал 15–18%.

На рис. 2, *b* приведена нормированная зависимость мощности генерации от величины индукции транспортирующего магнитного поля. При построении этой зависимости учитывалось ослабление импульсного поля соленоида за счет скин-эффекта в стенке медной ЗС, имевшей характерную толщину 1–1.5 mm. Зависимость снималась в контрольной точке диаграммы направленности. Видно, что при индукции > 5 Т мощность СВЧ-излучения возрастала приблизительно на 50% по сравнению с режимом генерации при индукции 2 Т, т.е. составила 360–420 MW. Различие в 1.5 раза гораздо менее выражено в сравнении с аналогичной

зависимостью [3,4], полученной ранее для ЗС с характерным поперечным размером ( $D \approx \lambda$ ), где расхождение было не менее 4 раз.

5. Таким образом, в режиме генерирования субнаносекундных импульсов излучения с помощью релятивистской ЛОВ диапазона 38 GHz получена пиковая мощность 240–280 MW при относительно низкой индукции магнитного поля ( $\sim 2$  Т). При индукции  $> 5$  Т измеренная мощность СВЧ-импульсов с длительностью 200–250 ps достигала 400 MW. Эти показатели в достаточной степени соответствуют расчетным значениям электронного к.п.д. ЛОВ, полученным в численном моделировании. Отметим, что из-за малой длительности импульса в экспериментах не наблюдался пробой выходного окна СВЧ-генератора или внутри замедляющей системы, где поток мощности достигал 300–400 MW/cm<sup>2</sup>.

Авторы работы признательны Н.С. Гинзбургу, В.П. Тараканову, И.В. Пегелю и А.И. Климову за стимулирующее обсуждение результатов, консультации и конструктивные замечания.

## Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. В. 7. С. 1037–1052.
- [2] Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р. и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. Т. 39. В. 12. С. 89–97.
- [3] Ginzburg N.S., Novozhilova N.Yu., Zotova I.V. et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 3297–3304.
- [4] Yalandin M.I., Shpak V.G., Shunailov S.A. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2000. V. 28. N 5. P. 1615–1619.
- [5] Яландин М.И., Шпак В.Г., Шунайлов С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 10. С. 19–23.
- [6] Gubanov V.P., Korovin S.D., Pegel I.V. et al. // Proc. of SPIE Symp. "Intense Microwave Pulses 4". Denver, Colorado, USA, 1996. V. 2843. P. 228–237.
- [7] Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 10. С. 43–47.
- [8] Яландин М.И., Любутин С.К., Рукин С.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 1. С. 81–88.
- [9] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. VA, USA: Berkeley Research Associates, Inc. 1992.
- [10] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. В. 12. С. 1189–1196.



- [11] *Shrak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R.* et al. // Proc of XI Int. Conf. on High Power Particle Beams. Prague, 1996. V. 2. P. 913–916.
- [12] *Штак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* и др. // ПТЭ. 1993. № 1. С. 149–155.
- [13] *Яландин М.И., Штак В.Г.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.