

09;12;10

Генерирование гигаваттных импульсов диапазона 10 GHz со стабильной фазой

© Д.М. Гришин, С.К. Любутин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов, С.Н. Рукин,
Б.Г. Словиковский, С.П. Тимошенко, М.Р. Ульмаскулов,
К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: rostov@lfe.hcei.tsc.ru

Физический институт им. П.Н. Лебедев РАН, Москва

E-mail: mesyats@pran.ru

Поступило в Редакцию 4 февраля 2008 г.

Нестационарная релятивистская лампа обратной волны диапазона 10 GHz исследована в режиме генерации на частоте повторения до 300 Hz. При пиковой мощности излучения ~ 1 GW и ~ 3 GW продемонстрированы режимы стабилизации фазы высокочастотного заполнения генерируемых импульсов излучения по отношению к фронту ускоряющего напряжения. В пакетах длительностью 10–100 с средняя мощность излучения достигала ~ 1 kW.

PACS: 52.70.Gw, 84.40.Fe

Настоящая работа является продолжением цикла исследований [1–3] нестационарного режима генерации субнаносекундных микроволновых импульсов с гигаваттным уровнем пиковой мощности в релятивистских лампах обратной волны (ЛОВ) диапазона сантиметровых волн. В развитие работ [4,5] представляла практический интерес демонстрация режима генерации СВЧ импульсов диапазона 10 GHz с длительностью < 1 ns и пиковой мощностью в единицы гигаватт продолжительными пакетами на частотах повторения более 100 Hz. Важным аспектом было изучение стабильности СВЧ генерации. По сравнению с экспериментами [4,5], где применялась стробоскопическая регистрация сигналов с СВЧ детектора при полосе осциллографа 6 GHz, в настоящих исследованиях использовалась регистрация в реальном времени при полосе цифрового осциллографа 15 GHz.

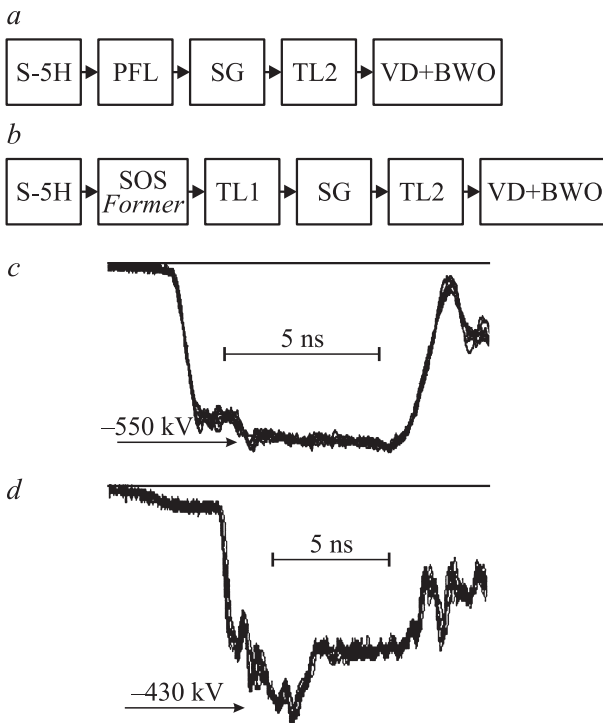


Рис. 1. *a* — блок-схема экспериментальной установки с гибридным модулятором ([5]); *b* — схема с дополнительной наносекундной SOS-системой компрессии мощности; *c, d* — импульсы ускоряющего напряжения на 75-омной TL2 в установках со схемами *a* и *b* соответственно. Обозначения: PFL-формирующая линия (50Ω); TL1 — спиральная линия (150Ω); TL2 — передающая линия (75Ω); SG — водородный разрядник; VD — вакуумный диод; BWO — электродинамический блок нестационарной ЛОВ.

На рис. 1, *a, b* представлены блок-схемы двух версий установки, использованной в экспериментах. Инжектор электронного пучка и электродинамическая система нестационарной ЛОВ идентичны для обоих вариантов и не менялись по сравнению с экспериментами [4,5]. Однако для питания охлаждаемого маслом соленоида был применен стабилизированный сетевой источник постоянного тока, обеспечивший

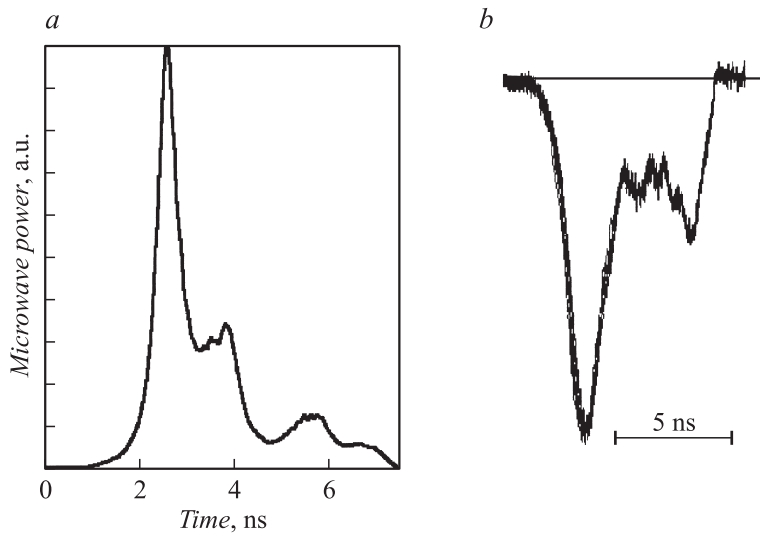


Рис. 2. *a* — огибающая мощности СВЧ импульса установки рис. 1, *a*, восстановленная по осциллограмме сигнала с учетом калибровки СВЧ детектора; *b* — типичная осциллограмма сигнала с СВЧ детектора, получаемая на частотах повторения 10–100 Hz для варианта установки на рис. 1, *b*.

постоянное магнитное поле ~ 0.6 Т для фокусировки пучка. В схеме на рис. 1, *a* оставались неизменными и другие блоки, но наносекундный твердотельный высоковольтный генератор С-5Н [6] прошел модернизацию, которая позволила увеличить напряжение на формирующей линии (ФЛ) при том же времени ее зарядки (~ 50 ns). В результате мощность импульса, подаваемого на катод ускорителя (рис. 1, *c*), возросла с 3.5 до 3.7–3.9 GW.

В экспериментах на установке со схемой, как на рис. 1, *a*, калориметрические измерения показали, что на частоте повторения 100 Hz в пакетах по 10 или 30 импульсов энергия излучения составила 3.3 J за импульс. Измерения воспроизводились с точностью не хуже 3%. Совокупность калориметрических и детекторных измерений огибающей СВЧ импульса (рис. 2, *a*) позволила определить максимальную мощность генерации импульсов на волне TM_{01} . Это значение было в преде-

лах 2.5–3 GW. Таким образом, конверсия мощности электронного пучка в мощность СВЧ составила 0.7–0.8. Это достаточно высокий показатель для нестационарной ЛОВ, работавшей в условиях транспортировки пучка пониженным (до циклотронного резонанса) магнитным полем. На частоте повторения 300 Hz в пакетах длительностью 10–100 s была достигнута средняя мощность СВЧ излучения ~ 1 kW. Максимальная продолжительность пакетов лимитировалась эффективностью системы охлаждения транспортирующего соленоида и коллектора электронного пучка. Число пакетных включений с количеством импульсов $3 \cdot 10^4$ в каждом было ограничено из-за роста задержки инжекции тока пучка с графитового взрывоэмиссионного катода по мере его тренировки. Этот эффект ранее наблюдался нами в экспериментах [7,8].

СВЧ генерация нестационарной ЛОВ также исследовалась при формировании импульсов ускоряющего напряжения по схеме на рис.1, *b*. Здесь ФЛ не использовалась, но был применен дополнительный каскад сжатия импульса генератора C-5H на основе полупроводникового SOS-прерывателя тока. Поскольку амплитуда ускоряющего импульса в данном случае была снижена, а форма его нерегулярна (рис. 1, *d*), то задача получения наибольших мощностей генерации не ставилась. Однако измеренная мощность СВЧ импульса была ~ 0.8 GW, что соответствовало расчетным данным в рамках моделирования методом крупных частиц [9]. Кроме того, обращала внимание хорошая стабильность генерации: на частоте повторения до 100 Hz дисперсия амплитуд импульсов с детектора (рис. 2, *b*) была на уровне 1%. Этот факт объяснялся тем, что вариант установки на рис. 1, *b* отличался уменьшенным (приблизительно в 7 раз) временем перенапряжения разрядника по сравнению со схемой на рис. 1, *a*. Это приводило к более стабильной коммутации и укорочению фронта импульса напряжения (до ~ 0.4 ns). Даже в отсутствие циркуляции и охлаждения газа в разряднике амплитудная дисперсия ускоряющих импульсов на частоте повторения 100 Hz была на уровне 1–2%. При этом полный разброс фронта коммутации разрядника в привязке к обостряемому импульсу был около 100 ps.

В этих условиях проведены измерения фазовой стабильности несущей частоты (10 GHz) микроволновой генерации от импульса к импульсу. Для регистрации использовалась волноводная антенна ($23 \cdot 10$ mm), набор волноводных аттенюаторов и волноводно-коаксиальный переход, сигнал с которого по кабелю подавался на осциллограф Tektronix

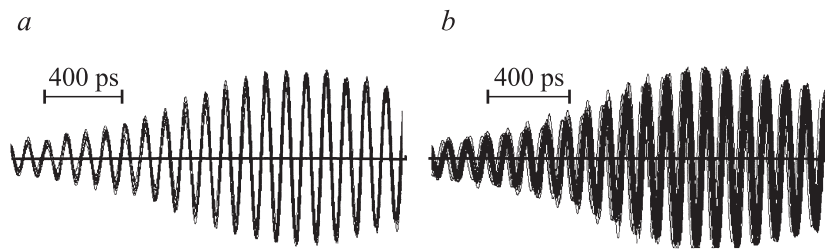


Рис. 3. Осциллограммы несущей частоты 10 GHz излучения ЛОВ при синхронизации осциллографа по фронту импульса ускоряющего напряжения, полученные на установке по схеме, рис. 1, *b*. Частота повторения импульсов: *a* — 10 Hz; *b* — 100 Hz. Записано 10 и 100 импульсов соответственно.

TDS6154C (15 GHz; 40 Gs/s). На рис. 3 показаны результаты регистрации несущей частоты СВЧ импульса при синхронизации запуска развертки осциллографа от фронта импульса ускоряющего напряжения (рис. 1, *d*). В физическом и практическом аспектах важен результат (рис. 3, *a*), полученный при малой частоте следования импульсов (до 10 Hz), когда режим коммутации разрядника и, соответственно, параметры фронта ускоряющего напряжения наиболее стабильны. От импульса к импульсу получена высокая воспроизводимость фазовой привязки несущей частоты по отношению к фронту ускоряющего напряжения. По осциллограмме на рис. 3, *a* видно, что разброс был не хуже ± 10 ps. Это составляет 20% от периода СВЧ колебаний на частоте 10 GHz. С ростом частоты повторения до 100 Hz (рис. 3, *b*) воспроизводимость параметра dV/dt на фронте ускоряющего напряжения ухудшалась. Соответственно, падала до ± 20 ps точность фазовой привязки несущей частоты.

Заметим, что в экспериментах с квазипрямоугольным ускоряющим импульсом (рис. 1, *c*) стабильность параметра dV/dt на фронте была ниже из-за большего времени предпробойного нарастания напряжения на разряднике. Соответственно, фазовая стабильность СВЧ импульса с мощностью 3 GW оказалась более „расплывчатой“, хотя и оставалась на уровне половины периода СВЧ заполнения вплоть до частот повторения 100 Hz.

Таким образом, стабилизация фазы СВЧ импульсов диапазона 10 GHz с пиковыми мощностями $\sim (1-3)$ GW получена в условиях, когда длительность фронта ускоряющего импульса как минимум в 4 раза превышает период высокочастотного заполнения. Это новый момент по сравнению с работой [10], где аналогичный эффект для нестационарной ЛОВ диапазона 3.7 GHz достигался при длительности фронта ускоряющего импульса, сравнимой с периодом СВЧ осцилляций. Вполне понятно, что эффект фазовой стабильности при генерации микроволн не зависит от длительности фронта ускоряющего импульса, если ненакапливаемый катод имеет бесконечную эмиссионную способность, то есть, — когда параметры токового импульса пучка абсолютно стабильны. Такая ситуация естественным образом реализуется, например, при полномасштабном численном PIC-моделировании СВЧ генераторов [9]. Демонстрация аналогичного эффекта в реальном эксперименте говорит о стабильности комплекса систем СВЧ прибора и физических процессов, сопровождающих их работу.

Очевиден практически важный аспект полученного результата. По сути, в [10] и в настоящей работе показана перспектива когерентного суммирования мощности нескольких микроволновых генераторов гигаваттного уровня, что ранее имело смысл рассматривать только для усилительных схем. То есть, решение задачи надлежащей синхронизации стабильных высоковольтных импульсов, прикладываемых к катодам ускорителей, открывает перспективу создания сверхмощных СВЧ источников с эффективными пиковыми мощностями до десятков гигаватт. Есть два пути продвижения в этом направлении. Во-первых, это очевидный вариант питания нескольких электронных инжекторов импульсом низкоомного высоковольтного генератора, расщепленным по параллельным каналам. Альтернативой может быть синхронизация независимых высоковольтных генераторов. В последнем случае требуется точность их включения ~ 10 ps. На данный момент у авторов есть основания полагать, что подобное прецизионное управление коммутацией газовых разрядников высокого давления возможно.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований РАН „Фундаментальные проблемы релятивистской импульсной и стационарной электроники большой мощности“ и при поддержке РФФИ, гранты: 05-02-08016, 07-08-12037 и 08-02-00183.

Список литературы

- [1] *Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V.* et al. // *Phys. Rev. E.* 2006. V. 74. N 1. P. 016501(1)–016501(8).
- [2] *Afanasyev K.V., Bykov N.M., Eltchaninov A.A.* et al. State of the Art in Pulse-Repetitive Generation of GW-level Superradiative Pulses // In: *Proc. of the 16th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA.* 2007. P. 1848–1851.
- [3] *Ginzburg N.S., Korovin S.D., Pegel I.V.* et al. *Laser Physics.* 2006. V. 16. N 1. P. 79–88.
- [4] *Коровин С.Д., Любутин С.К., Месяц Г.А.* и др. // *ПЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 17. С. 23–32.
- [5] *Любутин С.К., Рукін С.Н., Шарыпов К.А.* et al. // *IEEE Trans. on Plasma Science.* 2005. V. 33. N 4. P. 1220–1225.
- [6] *Бушляков А.И., Пономарев А.В., Рукин С.Н.* и др. // *ПТЭ.* 2002. № 2. С. 74–94.
- [7] *Гунин А.В., Коровин С.Д., Ландль В.Ф.* и др. // *ПЖТФ.* 1999. Т. 25. В. 22. С. 84–94.
- [8] *Коровин С.Д., Литвинов Е.А., Месяц Г.А.* и др. // *ПЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 19. С. 30–39.
- [9] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT // *Sprinfeld: BRA.*1992.
- [10] *Афанасьев К.В., Быков Н.М., Губанов В.П.* и др. // *ПЖТФ.* 2006. Т. 32. В. 21. С. 23–28.