

12

Двухканальный релятивистский генератор встречной волны диапазона 8 мм с управляемой разностью фаз и мощностью 230 MW в канале

© А.А. Ельчанинов, А.И. Климов, И.В. Романченко,
В.В. Ростов, М.С. Педос, С.Н. Рукин,
К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов,
М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

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

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: yalandin@iep.uran.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2013 г.

Реализовано когерентное сложение волновых пучков двух релятивистских наносекундных ЛОВ 8-миллиметрового диапазона с пиковой мощностью в каждом канале до 230 MW. Особенность эксперимента состояла в питании взрывоэмиссионных катодов расщепленными импульсами от полностью твердотельного SOS-модулятора с пониженным амплитудным разбросом. По сравнению с предыдущими экспериментами скорость нарастания напряжения была увеличена, и это позволило перейти в область пониженных магнитных полей ~ 2 Т (меньше циклотронного резонанса) с сохранением стабильной эмиссии электронных пучков. В результате на временной шкале зафиксировано стандартное отклонение разброса фаз между каналами 0.5 ps.

Исследования стабилизации фазы излучения сильноточных релятивистских ламп обратной волны (ЛОВ) [1–3] привели к доказательству возможности когерентного суммирования в свободном пространстве сантиметровых и миллиметровых волновых пучков от двух независимых СВЧ-генераторов [4–6]. Интегральная плотность потока мощности излучения в максимуме диаграммы направленности (ДН) квадратично растет от числа синфазных генераторов, и поэтому понятен интерес к увеличению количества каналов. Исследования в этом направлении актуальны для понимания условий стабилизации фазы автогенератора с

длительностью импульсов в десятки-сотни периодов колебаний, а также предполагают решение практических вопросов минимизации энергетических систем фокусировки пучков и повышения частоты повторения импульсов.

Наиболее важным результатом предыдущих исследований является доказательство самой возможности синхронизовать два канала 10-GHz ЛОВ [4] с точностью 1–2% по отношению к периоду в условиях, когда расщепленный импульс высоковольтного генератора имел стандартное отклонение амплитуды приблизительно того же уровня ($\sigma_v \approx 1\%$). Поскольку основным ограничением метода задания фазы следует считать конечный разброс времени формирования фронта тока пучка, достигнутая соизмеримость девиации указанных процессов позволяла рассчитывать на возможность сокращения периода колебаний. Действительно, переход в диапазон 8 mm при сохранении амплитуды напряжения в электронном диоде связан с ростом напряженности поля на кромке цилиндрического катода. Следовательно, должно значительно сокращаться среднее время задержки взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ), а также формироваться больше эмиссионных центров в окрестности момента времени с максимальной производной напряжения.

В отличие от [4], в эксперименте [6] с двумя параллельными каналами в виде ЛОВ диапазона длин волн 8 mm электронные инжекторы питались от двух формирующих линий Блюмлейна, включавшихся одним управляемым газовым разрядником. Вариация пространственного положения искры разрядника вносила дополнительный сдвиг фронтов ускоряющих импульсов и приводила к увеличению разброса разности фаз излучения между каналами. Задачей данной работы было устранить этот фактор за счет применения схемы с расщеплением импульса, как в экспериментах [4], и увеличить мощность излучения в каналах, несмотря на понижение магнитного поля, в котором формируются и транспортируются электронные пучки. Для эксперимента был подготовлен высоковольтный модулятор S-500 с полностью твердотельной системой коммутации на основе тиристоров, магнитных ключей и полупроводниковых SOS-диодов (прерыватели тока индуктивного накопителя).

Модулятор S-500 (модификация установки [2,7]) обеспечивает на 50-омном коаксиальном выходе импульс с длительностью на полувысоте ~ 5 ns и фронтом по уровню 0.1–0.9 около 1.5 ns. После деления на

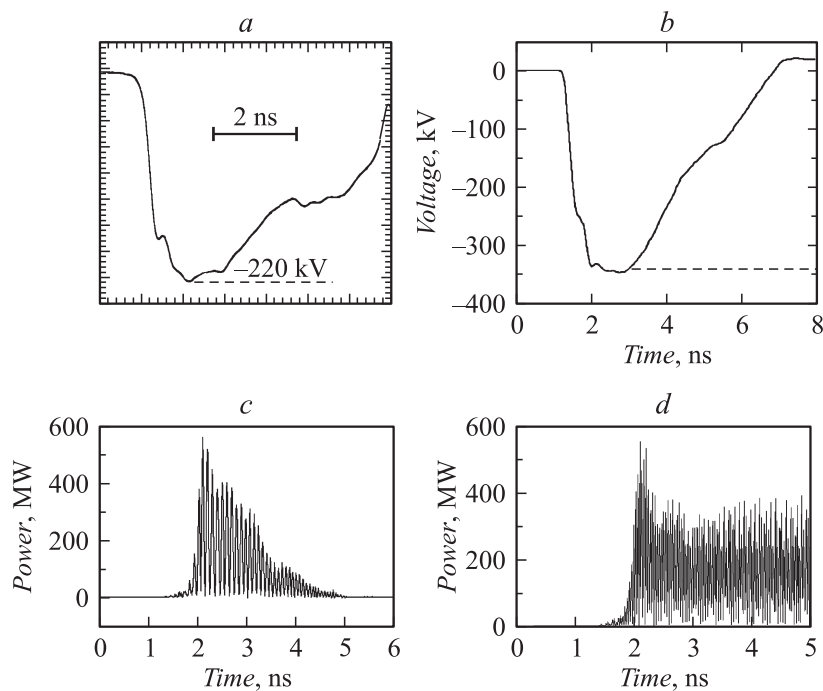


Рис. 1. *a* — осциллограмма импульса напряжения в одном из каналов после ферритового обострителя на 45-омном входе ступенчатой передающей линии; *b* — численный расчет трансформации импульса (*a*) при его передаче к катоду вакуумного диода с импедансом 140 Ω ; *c* — расчет неусредненной мощности генерации ЛОВ при ускоряющем импульсе на катоде (*b*); *d* — то же, что и (*c*), но в приближении удлиненного ускоряющего импульса (пунктирная линия, *b*).

два канала фронты обострялись коаксиальными линиями с насыщенным ферритом до ~ 300 ps [8]. На их выходе (45 Ω) напряжение достигало $V_{out} = -220$ kV (рис. 1, *a*). После передачи импульса по ступенчатой линии к вакуумному диоду с импедансом ~ 140 Ω амплитуда на квази-плоской части импульса возрастала до $V_c = -(330-340)$ kV (рис. 1, *b*). Примечательно, что попытки измерения разброса амплитуд напряжения в передающей линии не дали значений выше, чем шумы цифрового осциллографа, оцениваемые паспортной величиной $\sim 0.5\%$.

Увеличение амплитуды напряжения V_c на $\sim 30\%$ по сравнению с [6] определило несколько принципиальных особенностей работы электронных инжекторов. Во-первых, возросла крутизна фронта на катоде до $dV_c/dt \approx 1 \text{ MV/ns}$. В отсутствие предымпульса напряжения после обострения ферритовой линией предполагается, что рост dV_c/dt способствует большей локализации интервала времени, когда задается фаза начальных возмущений в токе пучка [5]. При измеренной амплитуде тока $\sim 2.4 \text{ kA}$ максимальное значение скорости роста тока на фронте пучка могло достигать $dI_b/dt \approx 4.5 \text{ kA/ns}$. Второй существенный момент связан с тем, что в пределе $dV_c/dt \rightarrow \infty$ автоэмиссионные центры на катоде при достаточном уровне локальной напряженности поля могут переходить в режим ВЭЭ с сокращением времени за счет ослабления роли взаимного экранирования [9,10]. При прочих равных условиях это приводит к нарастанию количества центров ВЭЭ и создает предпосылки для понижения внешнего магнитного поля. Отметим, что ранее в экспериментах [6] применялось сильное поле $\sim 5 \text{ T}$.

При неизменной геометрии замедляющих систем [6] рост ускоряющего напряжения (энергии электронов) на 30% и тока пучка в ~ 1.5 раза меняют режим работы ЛОВ, несмотря на ее известную адаптивность. Точка синхронизма электронов с обратной гармоникой волны TM_{01} при нормированной скорости частиц $\beta_e = v_e/c \approx 0.8$ смещается на дисперсионной зависимости в направлении „ π -вида“ (здесь c — скорость света), т.е. относительно [6] генерация стала более высокочастотной ($37 \text{ GHz} \rightarrow 39 \text{ GHz}$). Уменьшенная групповая скорость синхронной волны ($\beta_g \leq 0.3$) определяет также рост времени „закрывания кольца обратной связи“ $t_{\min} = L(\beta_e^{-1} + \beta_g^{-1})/c$, и для замедляющей системы ЛОВ длиной $L \approx 50 \text{ mm}$ оценка задержки начала генерации дает $t_{\min} \geq 0.7 \text{ ns}$. Это составляет существенную часть длительности ускоряющего импульса (рис. 1, *a*). В результате, расчет методом крупных частиц [11] даже в предположении безынерционной эмиссии катода показывает ограниченную длительность СВЧ-генерации (рис. 1, *c*). Более того, по сравнению с оптимальным по току пучка режимом генерации [12] расчеты показали относительное нарастание лидирующего пика излучения, что соответствует теоретическим представлениям [13] об автомодуляционном режиме работы ЛОВ. Как видно на рис. 1, *d*, первый пик мощности хорошо выделен в случае, если ускоряющий импульс не ограничен по длительности.

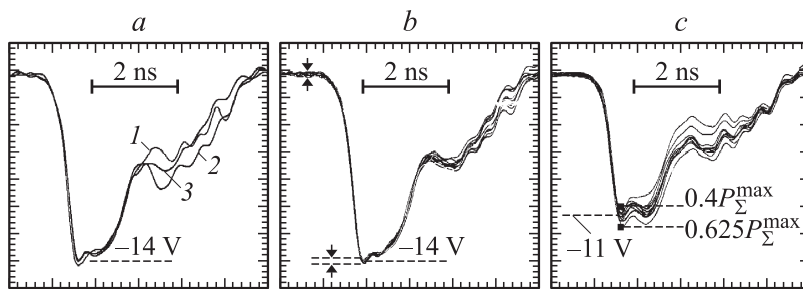


Рис. 2. *a* — осциллограммы сигналов СВЧ-детектора, соответствующие импульсам генерации отдельных ЛОВ (1 и 2) и при их суммировании с ослаблением мощности волноводным аттенюатором в 4 раза (3); *b* — накопление десяти последовательных суммированных сигналов СВЧ-детектора при сдвиге фаз излучения между каналами $\Delta\varphi_0 \approx 0$; *c* — то же, что в случае (*b*), но при $\Delta\varphi_0 \approx \pi/2$.

В экспериментах, как и в работе [6], огибающие мощности СВЧ-импульсов (рис. 2, *a*) регистрировались германиевым волноводным детектором на горячих носителях на расстоянии 7 м по главному направлению от двойной антенной системы. Энергия излучения отдельных каналов определялась калориметром [14] с вакуумированным приемным рупором и капиллярным измерителем объемного расширения поглотителя (этанол). По данным детекторных и калориметрических измерений пик излучения имел мощность 230 MW. При точности калибровки датчиков $\pm 15\%$, в верхнем пределе (~ 260 MW) эта величина близка к расчету (рис. 1, *c*). Как видно на рис. 2, *a* (лучи 1 и 2), огибающие сигналов детектора при работе отдельных каналов ЛОВ практически одинаковы. Совпадение фронтов свидетельствует о стабильности переходных процессов двух ЛОВ, идентичности токов и достаточном качестве транспортировки трубчатых пучков в магнитном поле 2.2 Т.

Сигнал детектора при интерференции двух линейно-поляризованных гауссовых волновых пучков (луч 3 на рис. 2, *a*) получен при ослаблении мощности в волноводном аттенюаторе в 4 раза (-6 dB). При равных фазах полей от отдельных ЛОВ наблюдается воспроизводимое когерентное сложение сигналов (рис. 2, *b*). При этом плотность потока мощности по главному направлению антенной системы соответствует

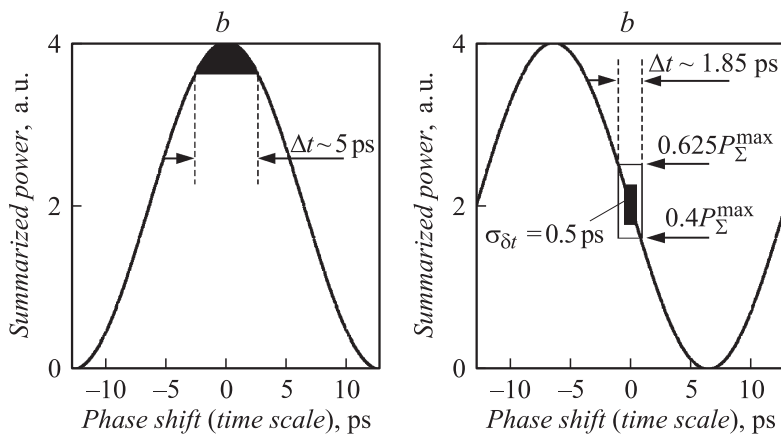


Рис. 3. К расчету фазового разброса по сигналам СВЧ-детектора. Мощность интегрального сигнала от двух ЛОВ в зависимости от относительного сдвига фаз, представленного по шкале времени: *a* — для случая $\Delta\varphi_0 \approx 0$ (рис. 2, *b*); *b* — для случая $\Delta\varphi_0 \approx \pi/2$ (рис. 2, *c*). В расчете мощность излучения каждого канала принята равной единице.

эквивалентному одноканальному генератору с мощностью, близкой к 1 GW.

Разброс амплитуд суммарного СВЧ-сигнала ΔP_Σ оказался меньше, чем в [6] — на уровне собственных шумов осциллографа (выделено стрелками на рис. 2, *b*). Использование этих данных для оценки нестабильности разности фаз $\Delta\varphi$ между каналами не дает достаточной точности, а результат неоднозначен из-за неопределенности знака $\Delta\varphi$ (рис. 3, *a*) [6]. Более информативен метод измерений с начальным сдвигом фаз между каналами $\Delta\varphi_0 = \pi/2$ (рис. 3, *b*) [4]. В отличие от [6], такая возможность имелась. При повышенной амплитуде высоковольтных импульсов обострение их фронтов до 300 ps, как и в работе [6], достигалось наложением аксиального поля подмагничивания ферритовых линий $H_z \geq 12$ kA/m. Однако для получения аналогичной относительной задержки фронтов ток в одном из соленоидов подмагничивания требовалось менять на порядок сильнее: 0.1 A/ps. В результате, существенно превысив уровень дрейфа тока источников питания, стало возможным надежно устанавливать необходимую задержку фронта с

высокой воспроизводимостью разности фаз от импульса к импульсу, которые выполнялись в режиме редкого повторения (~ 0.2 Hz).

При начальном фазовом сдвиге $\Delta\varphi_0 = \pi/2$ (на шкале времени это соответствует четверти периода колебаний) мощность в точке регистрации снижается до уровня 0.5 по отношению к максимальной (рис. 2, *c*). Из-за нелинейности вольт-ваттной характеристики СВЧ-детектора амплитуды сигналов при $\Delta\varphi_0 \approx 0$ (рис. 2, *b*) и $\Delta\varphi_0 \approx \pi/2$ (рис. 2, *c*) различаются меньше чем в 2 раза. С учетом калибровки детектора разброс плотности потока мощности при $\Delta\varphi_0 \approx \pi/2$ оказался в диапазоне $(0.40-0.625) \cdot P_{\Sigma}^{\max}$ (рис. 2, *c*), а стандартное отклонение от среднего составило 5.6%. Тогда, согласно рис. 3, *b*, полный разброс фаз излучения между двумя каналами ЛОВ (в пересчете на временную шкалу) составляет $\Delta t = 1.85$ ps при стандартном отклонении от среднего значения $\sigma_{\delta t} \leq 0.5$ ps.

Итак, описанный эксперимент подтвердил возможность весьма точной синхронизации двух каналов идентичных релятивистских ЛОВ в диапазоне длин волн ~ 8 mm. Этот результат получен при значительном росте мощности СВЧ-излучения в каждом канале, причем в условиях, когда фокусировка электронных пучков обеспечивалась пониженным магнитным полем импульсного соленоида. Так как требуемая конфигурация поля может быть воспроизведена с помощью фокусирующих систем из высококоэрцитивных постоянных магнитов [15], то с использованием модулятора S-500 в перспективе возможна реализация до 4 параллельных каналов с частотой повторения импульсов до 1 kHz [2,16].

Исследования проводились в рамках интеграционного проекта ИЭФ УрО РАН и ИСЭ СО РАН по направлению программы президиума РАН „Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники“ и при финансовой поддержке РФФИ, гранты 11-02-00097а, 11-08-00176а и 12-08-00476а.

Авторы признательны академикам Г.А. Месяцу и А.Г. Литваку за проявленный интерес.

Список литературы

- [1] *Афанасьев К.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 23–28.
- [2] *Гришин Д.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 19. С. 14–20.
- [3] *Яландин М.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 17. С. 41–49.

- [4] *Ельчанинов А.А.* и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 1. С. 125–130.
- [5] *Rostov V.V.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 224 102(1–4).
- [6] *Яландин М.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 20. С. 8–14.
- [7] *Рукин С.Н.* // ПТЭ. 1999. В. 4. С. 5–36.
- [8] *Romanchenko I.V.* et al. // Rev. Sci. Instr. 2012. V. 83. N 7. P. 074 705(1–6).
- [9] *Беломытцев С.Я.* и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 18. С. 1089–1092.
- [10] *Коровин С.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 11. С. 88–94.
- [11] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT Springfield: BRA, 1992.
- [12] *Ростов В.В.* и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 11. С. 85–92.
- [13] *Гинзбург Н.С.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. В. 7. С. 1037–1052.
- [14] *Коровин С.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 3. С. 68–74.
- [15] *Ермаков А.Е.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 18. С. 76–82.
- [16] *Гришин Д.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 19. С. 24–31.