

13

## О стабильности фазы излучения релятивистской коаксиальной лампы обратной волны дециметрового диапазона длин волн

© Е.М. Тотьменинов, А.И. Климов, В.Ю. Конев, В.В. Ростов,  
А.С. Степченко, Р.В. Цыганков

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

Поступило в Редакцию 4 августа 2014 г.

Продемонстрирована стабильность фазы СВЧ-излучения коаксиальной релятивистской лампы обратной волны с модулирующим рефлектором (КРЛОВ-РМ) по отношению к фиксированному уровню напряжения на переднем фронте питающего высоковольтного импульса. При несущей частоте 1.3 GHz в серии из 50 последовательных импульсов стандартное отклонение фазы было не более 20 ps в течение всей длительности СВЧ-импульса, составлявшей около 80 ns.

Стабилизация фазы автогенераторов импульсом модулирующего напряжения (без применения внешнего синхронизирующего СВЧ-сигнала) открывает путь к созданию многоканальных систем, состоящих из однотипных устройств, возбуждаемых параллельно общим источником импульсного напряжения. В результате появляется возможность формирования излучения с высокой степенью направленности и нарастающей максимальной плотностью потока мощности пропорционально  $N^2$ , где  $N$  — число элементов системы.

Впервые возможность получения стабильной от импульса к импульсу фазы СВЧ-излучения, достигаемая благодаря достаточно быстрому нарастанию напряжения  $U(t)$  на диоде, формирующем электронный пучок, была показана в работе [1] применительно к релятивистской лампе обратной волны (РЛОВ) с электродинамической системой на основе круглого гофрированного волновода, работавшей в режиме сверхизлучения на несущей частоте 3.7 GHz при относительно короткой длительности СВЧ-импульса около 3 ns. Стабильность фазы излучения

наблюдалась также в экспериментах с РЛОВ на несущих частотах 10 GHz [2,3] и 37 GHz [4,5]. Во всех указанных экспериментах применялись специальные устройства для обострения фронта импульса напряжения, чтобы удовлетворить теоретическому условию стабилизации фазы [5,6]

$$\tau_U \approx \frac{T}{C}, \quad (1)$$

где  $T$  — период высокочастотных колебаний,  $C = [eI_0Z/(2mc^2\gamma_0^3)]^{1/3}$  — обобщенный параметр Пирса. В последней формуле  $I_0$  — амплитуда тока электронного пучка,  $Z$  — его сопротивление связи с синхронной гармоникой рабочей волны,  $e$  и  $m$  — соответственно заряд и масса покоя электрона,  $\gamma_0$  — его релятивистский фактор, относящийся к амплитуде напряжения на диоде  $U_0$ . Временной параметр  $\tau_U$  определяется через максимальную производную на фронте импульса напряжения и его амплитуду:

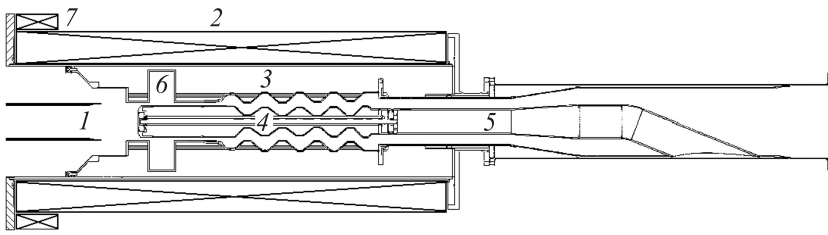
$$\tau_U = \frac{U_0}{(\partial U/\partial t)_{\max}}. \quad (2)$$

При выполнении (1) длительность нарастания тока пучка, определяемая аналогично (2), имеет заведомо меньшее значение [5]. Тогда спектральные компоненты от фронта тока имеют слабо изменяющиеся фазы в полосе взаимодействия [6]. Поэтому условие (1) необходимо, чтобы в отдельно взятом генераторе начальная фаза СВЧ-импульса была фиксированной,  $\varphi_{in} = \text{const}$ , от одного импульса к другому, а для параллельно возбуждаемых генераторов — в каждом импульсе. С учетом возможной девиации частоты  $\delta\omega$  ( $\omega$  — несущая круговая частота) в течение длительности  $\tau_m$  и от импульса к импульсу необходимо выполнить условия

$$\delta\omega\tau_m \ll \pi, \quad \delta\varphi_{in} \ll \pi, \quad (3)$$

где  $\delta\varphi_{in}$  — нестабильность начальной фазы [5]. В силу релятивистской зависимости скорости электронов от их энергии при малых изменениях амплитуды импульса напряжения ( $\delta U_0/U_0 < 1\%$ ) условия (3) могут выполняться, если форма этого импульса достаточно стабильно воспроизводится.

Основной целью данной работы в отличие от [1–5] была проверка возможности стабилизации фазы СВЧ-колебаний в экспериментах с СВЧ-генератором диапазона 1–2 GHz, при длительности импульса СВЧ-излучения  $\tau_m \approx 100T$  без обострения фронта импульса напряжения. Для диапазона частот 1–2 GHz представлялось целесообразным

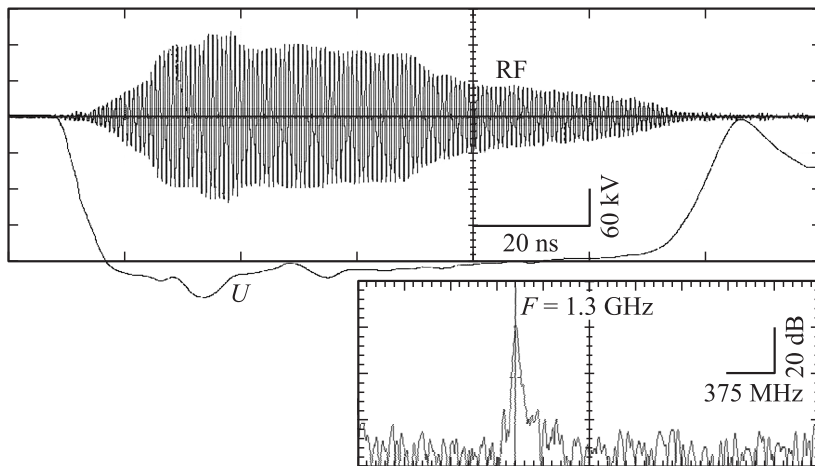


**Рис. 1.** Схема КРЛОВ-МР: 1 — кромочный взрывоземиссионный катод и катододержатель, 2 — катушка магнитного поля, 3 и 4 — проводники ЗС, 5 — преобразователь типа волны из ТЕМ в волну  $TR_{11}$  круглого волновода, 6 — модулирующий рефлектор, 7 — корректирующая катушка соленоида для увеличения длины однородного участка магнитного поля.

использовать конструкцию РЛОВ на основе коаксиальной замедляющей системы (ЗС) — КРЛОВ [7]. Это обусловлено малыми размерами электродинамической системы генератора ( $D/\lambda < 1$ ,  $L \approx 1.5\lambda$ , где  $D$  и  $L$  — средний диаметр и длина ЗС соответственно,  $\lambda$  — длина волны излучения) и коротким временем переходного процесса.

Эксперимент был выполнен с высокоточным ускорителем электронов „СИНУС-500-106“. Длительность импульса напряжения 106 ns обеспечивалась за счет использования в конструкции ускорителя комбинированной формирующей линии, состоящей из коаксиального и спирального участков [8]. Длительность фронта импульса напряжения была около 7 ns. Амплитуды напряжения на диоде и тока диода составляли около 300 и 3.6 kA соответственно. Конструкция экспериментального макета генератора представлена на рис. 1. Отражение обратной волны и предварительная модуляция электронного потока осуществлялись в области модулирующего рефлектора. Сопротивление связи  $Z \approx 10 \Omega$  [7]. Для вывода излучения использовался преобразователь волны ТЕМ в волну  $TE_{11}$  круглого волновода, которая затем излучалась из рупора в открытое пространство. Радиосигнал принимался антенной в виде короткого электрического вибратора [9] и регистрировался осциллографом LeCroy WaveMaster 830Zi с рабочей полосой до 30 GHz.

Типичные формы сигнала напряжения на диоде и радиосигнала представлены на рис. 2. Несущая частота была около 1.3 GHz. Вычисленное по осциллограмме  $U(t)$  значение составляет 6.4 ns. Для вышеуказанных



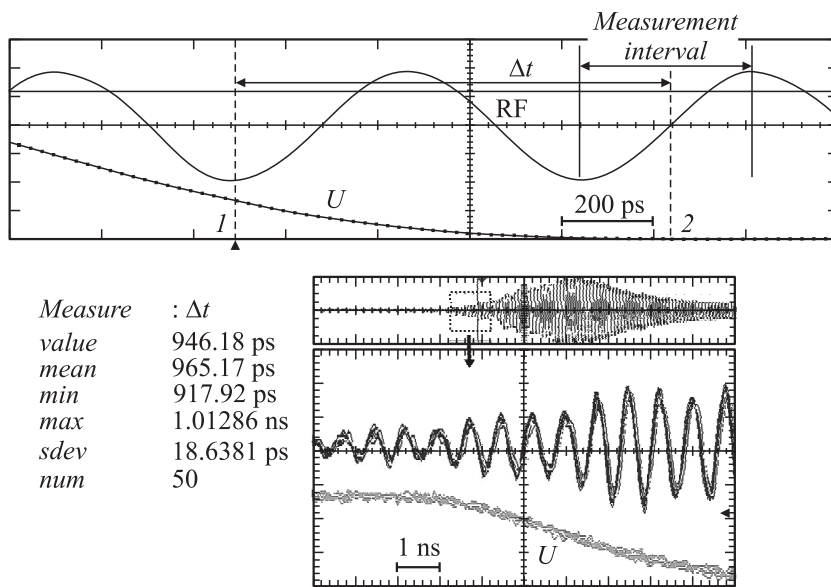
**Рис. 2.** Сигнал импульса высокого напряжения ( $U$ ), радиосигнал (RF) и его спектр.

параметров генератора оценка параметра Пирса дает величину  $C \approx 0.2$  ( $T/C \approx 4$  ns).

Падение амплитуды радиосигнала к концу импульса напряжения, вероятно, связано со следующими факторами. Аналогично работе [10] радиальное расширение катодной плазмы может приводить к ухудшению условий энергообмена электронного потока и электромагнитного поля (в течение импульса ток пучка возрастает, а напряжение в диоде падает), а также токопрохождения пучка вдоль пространства взаимодействия. Другая причина может быть связана с развитием взрывной электронной эмиссии на поверхности электродинамической структуры под влиянием интенсивных ВЧ-полей, которая приводит к подавлению или даже срыву генерации [11].

Способ измерения разброса фазы СВЧ-колебаний поясняется рис. 3.

Осциллограф запускался фронтом сигнала напряжения  $U(t)$ . Чувствительность запускающего канала устанавливалась на уровне  $20$  mV/div при амплитуде сигнала  $\approx 1$  V. Такое искусственное „увеличение“ крутизны фронта запускающего импульса приводит к снижению разброса момента запуска осциллографа. Затем, на фронте сигнала напряжения определялась точка (точка  $I$  на рис. 3,  $a$ ), где производная



**Рис. 3.** Схема измерения разброса фазы (а) и 10 наложенных осциллограмм радиосигналов (b).

$U'(t)$  имеет максимум. Уровень запуска осциллографа устанавливался равным напряжению в точке 1 (приблизительно 500 mV). На участке радиосигнала с постоянной амплитудой временная развертка устанавливалась равной 200 ps/div, что позволяло наблюдать на экране около двух периодов СВЧ-колебаний. На данном участке выбирался интервал длительностью, равной половине периода колебаний, включающий в себя максимум и минимум синусоиды, и определялась точка (точка 2 на рис. 3, а) пересечения синусоиды с нулевой линией. С использованием функции „Delay“ измерялось время задержки  $\Delta t$  между точками 1 и 2. В серии из нескольких последовательных импульсов с помощью математического аппарата осциллографа вычислялось стандартное отклонение  $\delta(\Delta t)$  величины  $\Delta t$ , дающее значение стандартного отклонения  $\delta\varphi$  выбранной фазы  $\varphi$  СВЧ-колебания (точка 2) относительно точки запуска осциллографа (точка 1). Минимальное стандартное отклонение  $\delta(\Delta t)$  регистрировалось в том случае, когда рабочая полоса канала

регистрации сигнала напряжения была 1 GHz, а канала регистрации СВЧ-сигнала — 3 GHz. Такие ограничения по полосам пропускания каналов снижали цифровой шум сигналов и давали более достоверное значение величины  $\Delta t$ .

На рис. 3, *a* представлен результат измерения  $\delta(\Delta t)$ , составивший около 19 ps для серии из 50 последовательных импульсов. При этом в процессе набора статистических данных значение  $\delta(\Delta t)$ , вычислявшееся по текущему количеству уже сделанных импульсов, не выходило за 20 ps. На рис. 3, *b* представлен результат наложения начального участка десяти последовательных осциллограмм радиосигналов.

Таким образом, показана возможность стабилизации фазы СВЧ-колебаний коаксиальной релятивистской лампы обратной волны в условиях, когда отсутствует обострение фронта импульса питающего напряжения. В выполненных экспериментах получена нестабильность фазы, характеризующаяся стандартным отклонением не более 20 ps для периода колебаний 770 ps (несущая частота — 1.3 GHz).

Авторы выражают благодарность С.А. Кицанову и М.Ю. Сухову за помощь в проведении эксперимента. Авторы благодарны также региональному центру коллективного пользования Томского научного центра СО РАН за возможность использования осциллографа LeCroy WaveMaster 830Zi.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-00003\_а, и соответствует теме № 13.1.2 государственного задания ИСЭ СО РАН на 2014 г.

## Список литературы

- [1] *Афанасьев К.В., Быков Н.М., Губанов В.П., Ельчанинов А.А., Климов А.И., Коровин С.Д., Ростов В.В., Степченко А.С.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 23–28.
- [2] *Гришин Д.М., Любутин С.К., Месяц Г.А., Ростов В.В., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Тимошенков С.П., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 19. С. 14–20.
- [3] *Ельчанинов А.А., Климов А.И., Ковальчук О.Б., Месяц Г.А., Пегель И.В., Романченко И.В., Ростов В.В., Шарыпов К.А., Яландин М.И.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 1. С. 125–130.

- [4] Яландин М.И., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Ростов В.В., Романченко И.В., Ельчанинов А.А., Климов А.И. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 20. С. 8–14.
- [5] Ростов В.В., Ельчанинов А.А., Романченко И.В., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Рукин С.Н., Яландин М.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 8–9. С. 525–543.
- [6] Rostov V.V., El'chaninov A.A., Romanchenko I.V., Yalandin M.I. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 224 102–224 102-4.
- [7] Тотменинов Е.М., Климов А.И., Конев В.Ю., Пегель И.В., Ростов В.В., Цыганков Р.В., Тараканов В.П. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 4. С. 23–32.
- [8] Totmeninov E.M., Gunin A.V., Klimov A.I., Rostov V.V., Stepchenko A.S., Yukhodtsev P.V., Mahir A.H. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2012. V. 40. N 6. Part 1. P. 1590–1593.
- [9] Klimov A.I., Konev V.Yu. // Proc. of the 15th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2008. P. 434–436.
- [10] Тотменинов Е.М., Выходцев П.В., Гунин А.В., Климов А.И., Ростов В.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 3. С. 120–125.
- [11] Коровин С.Д., Месяц Г.А., Пегель И.В., Полевин С.Д., Тараканов В.П. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 6. С. 27–36.