

13.4

## Генерация периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов на частоте 12.5 GHz с периодом следования 4 ns в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны

© Е.М. Тотьменинов<sup>1</sup>, В.Ю. Конев<sup>1</sup>, П.В. Выходцев<sup>1</sup>, О.О. Мутылин<sup>1</sup>, Ф.И. Шеерман<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

E-mail: totm@fe.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 12 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 12 марта 2024 г.

Принято к публикации 15 апреля 2024 г.

В эксперименте реализован режим генерации периодической последовательности ультракоротких импульсов сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны на частоте 12.5 GHz. В течение одиночного импульса тока электронного пучка (40 ns) генерируется восемь импульсов с длительностью каждого по половинному уровню пиковой мощности около 1 ns и периодом следования 4 ns (частота следования 250 MHz). Пиковая мощность таких импульсов находится в диапазоне 0.2–0.65 GW, а соответствующие коэффициенты конверсии, определяемые как отношение пиковой мощности к мощности электронного пучка, — в диапазоне 0.3–0.6. При этом имеют место корреляция между первым и последующими импульсами последовательности и строгая периодичность их следования.

**Ключевые слова:** релятивистская лампа обратной волны, сверхизлучение, сильноточный электронный пучок.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58434.19886

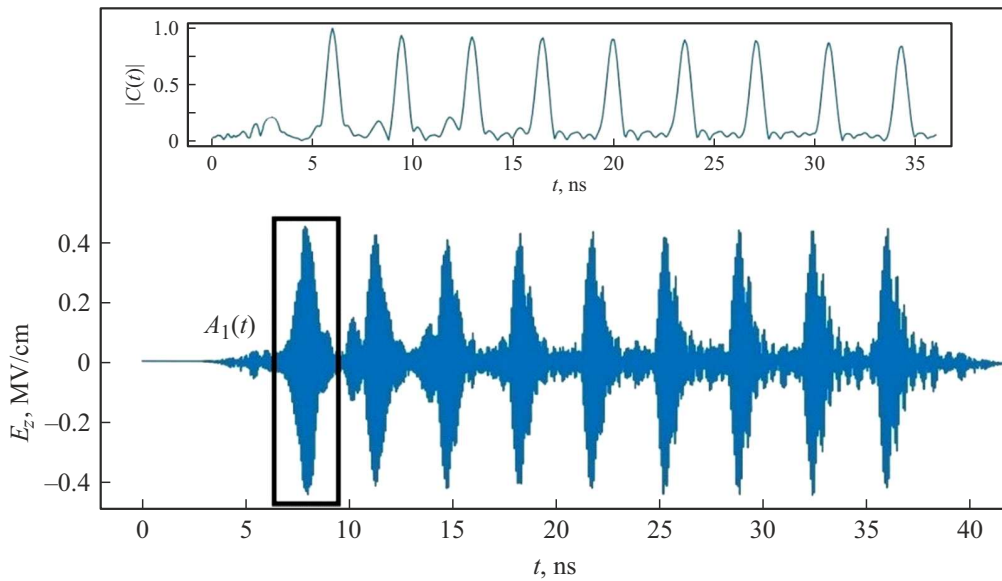
В последнее время активно ведутся исследования, направленные на практическую реализацию режима СВЧ-генерации в виде периодической последовательности ультракоротких импульсов (УКИ) (длительностью в несколько периодов колебаний) с частотой следования в сотни мегагерц в различных частотных диапазонах [1–4]. Интерес к таким разработкам вызван работами по тематике электромагнитной совместимости электронных устройств, в которых было отмечено, что такое СВЧ-излучение может эффективно проникать в радиоэлектронную аппаратуру через ее приемные тракты [5]. К настоящему моменту в области мощной СВЧ-электроники разработаны и исследованы различные схемные решения, в которых реализуется такой режим генерации. Общим в них является наличие цепи обратной связи, которая задает период следования таких СВЧ-импульсов. Поскольку каждый сформированный УКИ участвует в формировании последующего, было теоретически предсказано [1,3] и затем продемонстрировано в эксперименте [2] наличие корреляции между импульсами последовательности. Это, в частности, может представлять большой интерес для развития наносекундной радиолокации [6,7].

Настоящая работа является продолжением цикла теоретических и экспериментальных исследований способа генерации последовательности УКИ на основе релятивистской лампы обратной волны, работающей в режиме сверхизлучения [8]. При этом решались следующие задачи: увеличение числа УКИ при заданной длительности

импульса тока сильноточного электронного пучка около 40 ns, демонстрация стабильной работы СВЧ-генератора в режиме работы сильноточного ускорителя электронов с частотой повторения до 50 Hz, экспериментальное подтверждение наличия корреляции СВЧ-импульсов последовательности. С этой целью была разработана конструкция СВЧ-генератора для частоты колебаний 12.5 GHz с цепью обратной связи, обеспечивающей период следования УКИ в последовательности около 4 ns.

В эксперименте исследовалась схема сверхизлучательной релятивистской лампы обратной волны с волновыми отражателями на краях пространства взаимодействия, принцип работы которой был подробно описан в теоретической работе [3]. Конструкция прибора включала два рефлектора, один из которых располагался на входе в замедляющую систему со стороны катодного узла и обеспечивал полное отражение падающей СВЧ-волны. Другой рефлектор, расположенный на выходе генератора со стороны коллектора электронов, возвращал в замедляющую систему около 10% мощности. Позднее данная схема была успешно протестирована в эксперименте для частоты генерации 10 GHz [4]. В основе ее работы лежит механизм накопительного отбора энергии у электронного пучка импульсом сверхизлучения, зарождающимся на коллекторном конце прибора и затем распространяющимся навстречу невозмущенному электронному потоку.

Численное моделирование работы СВЧ-генератора было выполнено с помощью осесимметричной версии



**Рис. 1.** Расчетная зависимость продольной компоненты высокочастотного электрического поля ( $E_z$ ) на оси системы от времени вблизи СВЧ-поглотителя. На вставке показана огибающая модуля нормированной корреляционной функции.

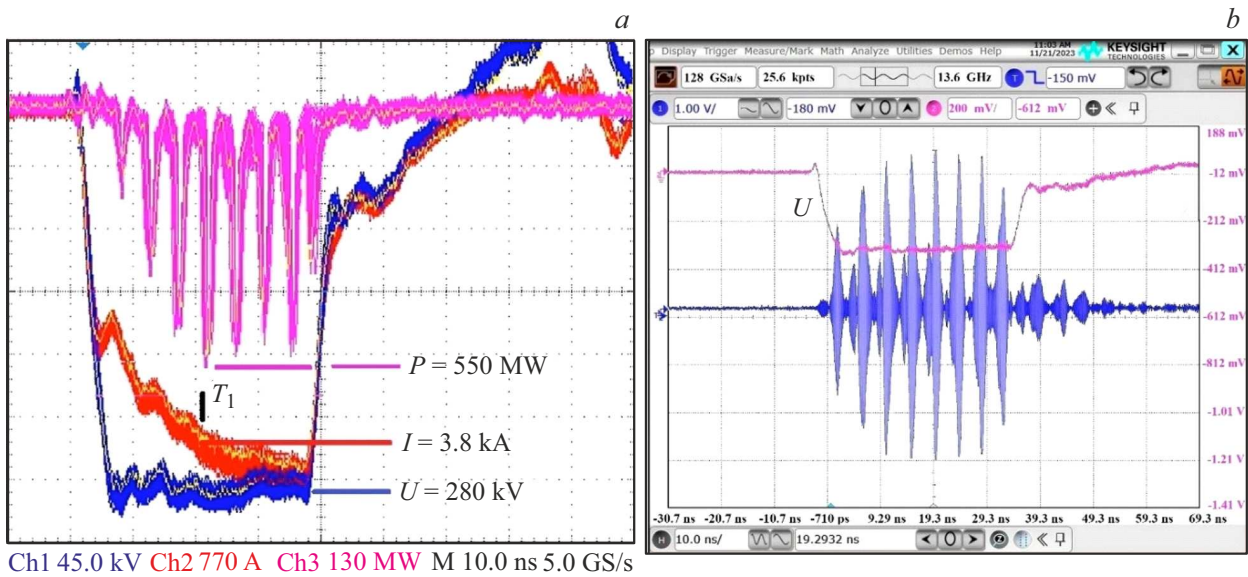
PiC-кода KARAT [9]. В результате при токе электронного пучка 4.5 kA, ускоряющем напряжении 300 kV, длительности импульса тока 40 ns с фронтом 5 ns и ведущем магнитном поле 2.0 T получена генерация последовательности ультракоротких СВЧ-импульсов на частоте  $F_{gen} \approx 12.5$  GHz. Расчетная частота следования импульсов 250 MHz. Пиковые мощности всех УКИ составили около 1 GW. На рис. 1 и вставке к нему представлены осциллограмма электрического поля волны на выходе генератора и полученная в результате ее обработки нормированная корреляционная функция  $C(t)$  между первым (тестовым) импульсом  $A_1(t)$  и полной последовательностью импульсов  $A(t)$ :

$$C(t) = \frac{1}{T_{rep}} \int_0^{T_{rep}} A_1(t') A^*(t' - t) dt' \times \left( \frac{1}{T_{rep}} \int_0^{T_{rep}} |A_1(t')|^2 dt' \frac{1}{T_{rep}} \int_0^{T_{rep}+t} |A(t')|^2 dt' \right)^{-1/2},$$

где  $T_{rep} \approx 4$  ns — период следования импульсов. При проведении экспериментальных исследований в качестве высоковольтного источника использовался сильноточный импульсный генератор серии SINUS с тройной формирующей линией, который формировал импульсы напряжения с амплитудой до 330 kV и длительностью около 40 ns. Трубочатый релятивистский электронный пучок эмитировался с кромочного взрывоэмиссионного катода диаметром 28 mm и формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией. Магнитное поле, транспортирующее пучок через электродинамическую систему СВЧ-генератора, создавалось соленоидом постоянного тока с масляным охлаждением катушек и длиной однородного участка магнитного

поля 450 mm. На выходе СВЧ-генератора устанавливался направленный ответвитель на основе круглого волновода. Для регистрации амплитуды и формы УКИ сигнал с ответвителя передавался на ламповый детектор и регистрировался осциллографом Tektronix TDS 7404 (4 GHz, 20 GS/s). Регистрация радиосигналов с ответвителя осуществлялась с помощью осциллографа Keysight (Agilent) UXR0134A (13 GHz, 128 GS/s).

При амплитуде напряжения на вакуумном диоде 280 kV, токе пучка 3.8 kA и ведущем магнитном поле 1.8 T получен режим генерации периодической последовательности УКИ (рис. 2) с длительностью по половинному уровню пиковой мощности около 1 ns и частотой следования 250 MHz (период следования около 4 ns). Такое значение (4 ns) соответствует периоду обратной связи в генераторе, оцениваемому как  $T_{rep} = L (v_{gr}^{-1} + v_e^{-1})$ , где  $v_e$  — скорость электронов в пучке,  $v_{gr}$  — групповая скорость встречной электромагнитной волны,  $L$  — длина системы. Для единичной осциллограммы последовательности СВЧ-импульсов, выбранной из набора 50 осциллограмм (рис. 2, a), оценки пиковой мощности УКИ в измерениях с помощью волноводного ответвителя и лампового детектора составляют: первый —  $P_1 = 0.21 \pm 0.04$  GW, второй —  $P_2 = 0.36 \pm 0.05$  GW, третий —  $P_3 = 0.49 \pm 0.07$  GW, четвертый —  $P_4 = 0.55 \pm 0.08$  GW, пятый —  $P_5 = 0.52 \pm 0.08$  GW, шестой —  $P_6 = 0.49 \pm 0.07$  GW, седьмой —  $P_7 = 0.52 \pm 0.08$  GW, восьмой —  $P_8 = 0.34 \pm 0.05$  GW. Ламповый детектор работал в режиме квадратичного детектирования, когда его вольт-ваттная характеристика может быть аппроксимирована линейной функцией. Соответствующие коэффициенты конверсии, определяемые как отношение пиковой мощности каждого СВЧ-импульса к мощности электронного пучка в момент времени  $T_1$ , лежат в диапазоне



**Рис. 2.** *a* — осциллограммы, полученные в режиме накопления за 50 последовательных срабатываний ускорителя электронов, работающего в режиме с частотой повторения 50 Hz; *b* — типичная одиночная осциллограмма последовательности радиосигналов.

$K_{1-8} = 0.2-0.5$ . В серии из 50 последовательных срабатываний ускорителя максимальный разброс амплитуд СВЧ-импульсов не превышал 15%. Измерения пиковой мощности УКИ на основе радиосигналов (рис. 2, *b*) дали следующий результат: пиковые мощности  $P_1 = 0.20 \pm 0.01$  GW,  $P_2 = 0.35 \pm 0.03$  GW,  $P_3 = 0.56 \pm 0.04$  GW,  $P_4 = 0.64 \pm 0.05$  GW,  $P_5 = 0.65 \pm 0.05$  GW,  $P_6 = 0.59 \pm 0.04$  GW,  $P_7 = 0.57 \pm 0.04$  GW,  $P_8 = 0.35 \pm 0.03$  GW, коэффициенты конверсии  $K_{1-8} = 0.3-0.6$ . Свечение панели из газоразрядных ламп под действием СВЧ-излучения имело вид кольца, что свидетельствовало о селективном возбуждении волны симметричного типа  $TM_{01}$ .

Наличие заметного „пьедестала“ на осциллограммах детектированных СВЧ-сигналов (рис. 2, *a*), появляющегося в момент генерации первого УКИ и исчезающего с последним импульсом, можно связать с „шумовой“ генерацией в паузах между соседними импульсами, имеющей широкий и нестабильный спектр. Такая генерация может быть вызвана возмущениями, остающимися в электронном пучке после каждого акта генерации УКИ. Необходимо отметить, что подобный эффект наблюдался и в численном моделировании, где фиксировались спектральные компоненты значительно выше 12 GHz, а уровень мощности „шумовой“ генерации составлял не более 50 MW.

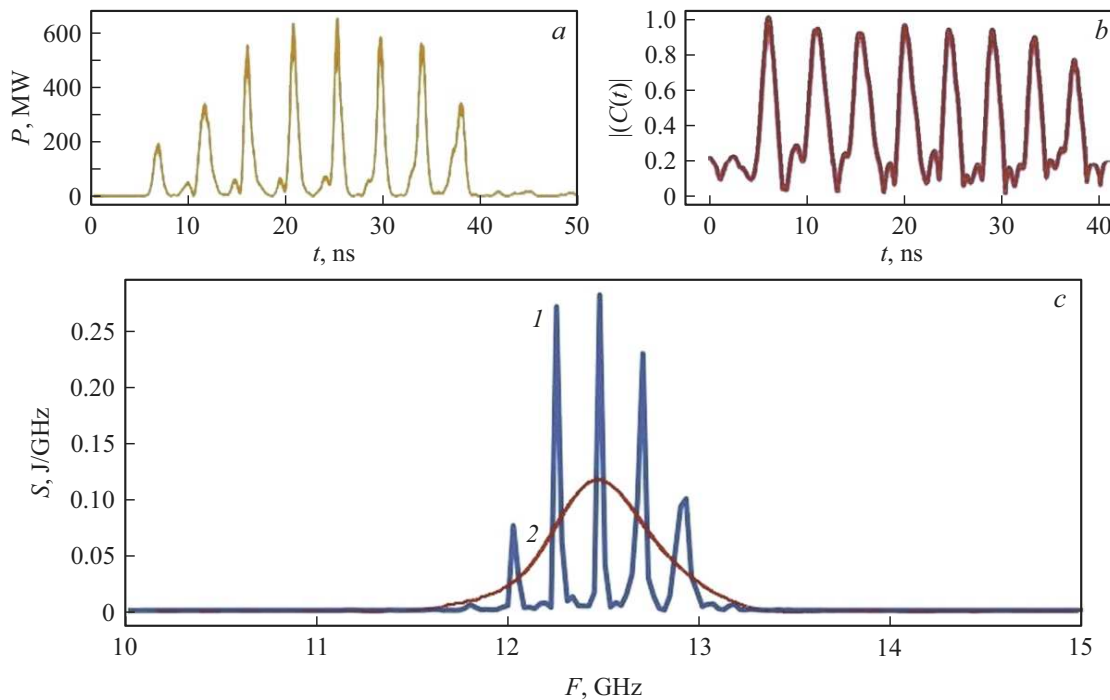
Результаты обработки последовательности радиосигналов, показанных на рис. 2, *b*, в том числе с помощью корреляционной функции  $C(t)$  и преобразования Фурье, представлены на рис. 3, *a-c*.

Равные частотные интервалы  $\Delta F \approx 0.25$  GHz (рис. 3, *c*) между спектральными линиями свидетельствуют о строгой периодичности следования СВЧ-импульсов ( $T_{rep} \approx 4$  ns). Также следует обратить внимание на узость спектральных линий. Оба

этих факта вместе могут служить доказательством когерентности генерируемых УКИ, что дополнительно подтверждается расчетом автокорреляционной функции с использованием зарегистрированного радиочастотного сигнала. Центральная частота колебаний в каждом УКИ около 12.5 GHz.

Необходимо заметить, что в численном моделировании пиковая СВЧ-мощность УКИ в пределах всей их последовательности отличается от полученной в эксперименте (для первого и второго импульсов в несколько раз превышает экспериментальные значения). Это расхождение, скорее всего, вызвано значительной задержкой в нарастании тока электронного пучка, эмитируемого со взрывоэмиссионного катода, по отношению к фронту импульса ускоряющего напряжения. Действительно, в численном расчете ток электронного пучка нарастает синхронно с ускоряющим напряжением и достигает требуемой величины 4.5 kA через 5 ns. В эксперименте же (рис. 2, *a*) первый и второй импульсы формировались в условиях, когда ускоряющее напряжение уже стабилизировалось, а ток электронного пучка все еще продолжает нарастать. Причина последнего состоит в том, что в эксперименте не были приняты необходимые меры по оптимизации катодного узла. Следует ожидать, что его целенаправленная доработка позволит значительно увеличить пиковую мощность первых УКИ.

Важнейшим результатом проведенной работы является экспериментальное подтверждение корреляции генерируемых УКИ. Кроме того, наблюдавшееся относительно небольшое снижение пиковой мощности таких импульсов к концу последовательности может свидетельствовать о существовании ресурса для дальнейшего увеличения числа СВЧ-импульсов в последовательности как за счет перехода в более высокочастотный диапазон,



**Рис. 3.** *a* — поведение усредненной за период колебания ( $T_{osc} = 1/F_{gen}$ ) мощности генерации во времени; *b* — огибающая модуля нормированной корреляционной функции; *c* — спектральные плотности энергии всей последовательности УКИ (1) и импульса, имеющего максимальную амплитуду (2).

так и за счет увеличения длительности импульса тока электронного пучка.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность К.О. Селявскому и С.А. Кицанову за помощь при проведении экспериментальной части работы. Отдельная благодарность центру коллективного пользования „Импульс“ Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники за предоставление осциллографа Keysight (Agilent) UXR0134A для проведения спектральных измерений.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (тема № FWRM-2021-0002).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

[1] Н.С. Гинзбург, Э.Б. Абубакиров, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, *ЖТФ*, **88** (8), 1241 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.08.46316.2581 [N.S. Ginzburg, E.B. Abubakirov, M.N. Vilkov, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, *Tech. Phys.*, **63** (8), 1205 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218080078].

[2] N.S. Ginzburg, S.V. Samsonov, G.G. Denisov, M.N. Vilkov, I.V. Zotova, A.A. Bogdashov, I.G. Gachev, A.S. Sergeev, R.M. Rozental, *Phys. Rev. Appl.*, **16** (5), 054045 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.054045

[3] Е.М. Тотьменинов, В.В. Ростов, *Письма в ЖТФ*, **47** (1), 51 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.01.50460.18527 [E.M. Totmeninov, V.V. Rostov, *Tech. Phys. Lett.*, **47** (1), 46 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021010119].

[4] Е.М. Тотьменинов, В.Ю. Конев, А.И. Климов, И.В. Пегель, *Письма в ЖЭТФ*, **115** (8), 479 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822080031 [E.M. Totmeninov, V.Yu. Konev, A.I. Klimov, I.V. Pegel, *JETP Lett.*, **115** (8), 444 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022100356].

[5] С.Ф. Боев, П.Н. Пименов, С.А. Пронин, А.В. Шевырев, *Тр. МАИ*, вып. 93, 20 (2017).

[6] Н.Н. Бадулин, А.П. Батула, В.П. Губанов, А.И. Климов, С.Д. Коровин, А.И. Мельников, *ПТЭ*, № 6, 111 (1998). [N.N. Badulin, A.P. Batsula, A.I. Mel'nikov, V.P. Gubanov, A.I. Klimov, S.D. Korovin, *Instrum. Exp. Tech.*, **41** (6), 847 (1998).].

[7] В.А. Вдовин, В.В. Кулагин, Е.В. Митрофанов, В.А. Черепнин, *Журн. радиоэлектроники*, № 12, 1 (2012).

[8] А.А. Ельчанинов, С.Д. Коровин, В.В. Ростов, И.В. Пегель, Г.А. Месяц, М.И. Яландин, Н.С. Гинзбург, *Письма в ЖЭТФ*, **77** (6), 314 (2003). [A.A. El'chaninov, S.D. Korovin, V.V. Rostov, I.V. Pegel, G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.S. Ginzburg, *JETP Lett.*, **77** (6), 266 (2003). DOI: 10.1134/1.1577754].

[9] В.П. Тараканов, *Математическое моделирование: проблемы и результаты* (Наука, М., 2003), с. 456–476.