

Способ генерации периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны

Тотьменинов Е. М., Конев В. Ю., Выходцев П. В.

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
просп. Академический, 2/3, 634055, г. Томск, Российская Федерация
totm@lfe.hcei.tsc.ru*

Получено: 26 апреля 2024 г.

Отрецензировано: 2 мая 2024 г.

Принято к публикации: 2 мая 2024 г.

Аннотация: Предложен и реализован способ генерации периодической последовательности мощных ультракоротких СВЧ-импульсов на основе режима сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны в течение одиночного импульса тока сильноточного релятивистского электронного пучка наносекундной длительности. На основе нестационарных численных кодов показано, что данный режим реализуется за счет введения отражений на концах замедляющей системы генератора. Работоспособность способа подтверждена экспериментально для частот генерации 10 GHz и 12 GHz. Получены режимы генерации ультракоротких (длительность около 1 ns) гигаваттных СВЧ-импульсов с периодом следования в единицы наносекунд (частота следования сотни мегагерц). Коэффициенты конверсии таких импульсов, определяемые как отношение пиковой СВЧ-мощности к мощности электронного пучка, достигали значений выше единицы. В эксперименте наблюдалась корреляция между импульсами последовательности и их строгая периодичность.

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

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Тотьменинов Е. М., Конев В. Ю., Выходцев П. В. Способ генерации периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2024. Т. 7, № 1. С. 81—92.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Тотьменинов, Е. М. Способ генерации периодической последовательности субгигаваттных ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования в режиме сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны / Е. М. Тотьменинов, В. Ю. Конев, П. В. Выходцев // Информационно-коммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 81—92.

1. Введение

Интерес к режимам СВЧ-генерации в виде периодической последовательности ультракоротких импульсов (УКИ), длительность которых составляет несколько периодов колебаний, а частота следования сотни мегагерц, главным образом вызван работами по тематике электромагнитной совместимости электронных устройств. В ряде работ, например [1], было отмечено, что такое СВЧ-излучение может наиболее эффективно проникать в радиоэлектронную аппаратуру через ее приемные тракты. Другой возможной областью их применения может быть наносекундная радиолокация [2]. В последнее время в области мощной СВЧ-электроники разработаны и исследованы различные схемные решения, в которых реализуются такие режимы генерации вплоть до гигаваттного уровня выходной СВЧ-мощности. Это, например, конструкции [3, 4] с использованием комбинаций релятивистских ламп обратной (РЛОВ) и бегущей волны, в которых одна выступает в качестве активного элемента (усилитель), а другая как нелинейный насыщающийся поглотитель в цепи обратной связи. Альтернативный подход [5, 6], который описан в данной работе, основан на релятивистской лампе обратной волны (РЛОВ), работающей в режиме сверхизлучения [7]. Общим во всех конструкциях является наличие цепи обратной связи, которая задает период следования таких СВЧ-импульсов. При этом, поскольку в формировании каждого УКИ участвует предыдущий импульс, было теоретически предсказано [3, 5] и затем продемонстрировано в эксперименте [4] наличие корреляции между импульсами последовательности.

2. Блок схема генератора, результаты нестационарного численного моделирования

Принцип работы РЛОВ в режиме сверхизлучения основан на механизме накопительного отбора энергии у электронного пучка ультракоротким электромагнитным импульсом (импульсом сверхизлучения), зарождающимся на коллекторном конце прибора и затем распространяющимся навстречу невозмущенному электронному потоку. Отбор энергии осу-

ществляется за один проход. Упрощенная блок-схема генератора изображена на рис. 1. На выходе генератора расположен рефлектор, отражающий часть излучаемой СВЧ-мощности обратно в область замедляющей системы РЛОВ ($|R| < 1$), а на его коллекторном конце, где осаждается электронный пучок, осуществляется полное отражение ($|R| = 1$) падающей СВЧ-мощности в режиме короткого замыкания. Вначале анализ работы такой схемы был проведен с использованием простейшей нестационарной модели РЛОВ [5] в приближении ультрарелятивистских энергий электронного пучка ($\gamma \gg 1$, где γ — фактор Лоренца) и однонаправленного движения электронов, а затем на основе PIC-кода KARAT [8] с использованием модифицированной схемы генератора с целью вывода СВЧ-излучения в сторону коллектора электронов (рис. 2, 3). Здесь и далее используются следующие выражения: $K = P_{peak} / P_{beam}$ — коэффициент конверсии, который определяется как отношение мощности излучения, выводимой в нагрузку, к мощности электронного пучка;

$$C(t) = \int_0^{T_{rep}} A_1(t') A^*(t' - t) dt' / \sqrt{\int_0^{T_{rep}} |A_1(t')|^2 dt' * \int_t^{T_{rep}+t} |A(t')|^2 dt'} —$$

нормированная взаимная корреляционная функция $C(t)$ между первым (тестовым) импульсом $A_1(t)$ и полной последовательностью импульсов $A(t)$, где T_{rep} — период следования импульсов.

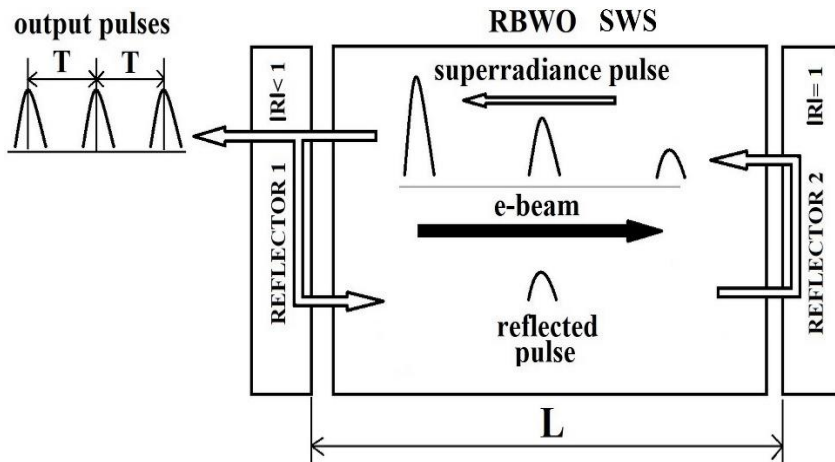


Рис. 1. Блок-схема генератора для получения последовательности УКИ на основе РЛОВ, работающей в режиме сверхизлучения. $|R|$ — модуль коэффициента отражения, SWS — замедляющая система.

Fig. 1. Block diagram of a generator for obtaining a sequence of ultrashort pulses based on radar, operating in superradiance mode. $|R|$ — reflection coefficient modulus, SWS — slowing system

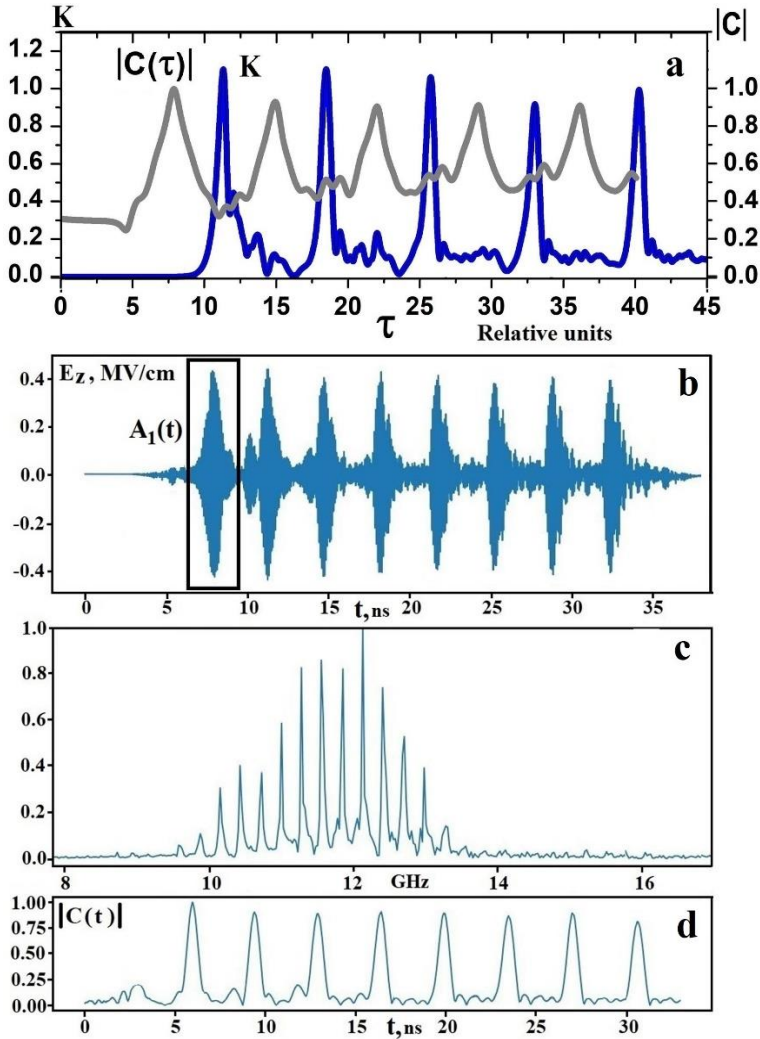


Рис. 2. Расчет с помощью простейшей нестационарной численной модели (а); расчет на основе PIC-кода KARAT: зависимость продольной компоненты ВЧ-электрического поля (E_z) от времени в сечении, расположенном на выходе из области расчета (b); спектр всей последовательности СВЧ-импульсов (c); огибающая модуля нормированной взаимной корреляционной функции (d).

Fig. 2. Calculation using the simplest non-stationary numerical model (a); calculation based on the KARAT PIC code: dependence of the longitudinal component of the HF electric field (E_z) on time in the section located at the exit from the calculation area (b); spectrum of the entire sequence of microwave pulses (c); envelope of the modulus of the normalized cross-correlation function (d)

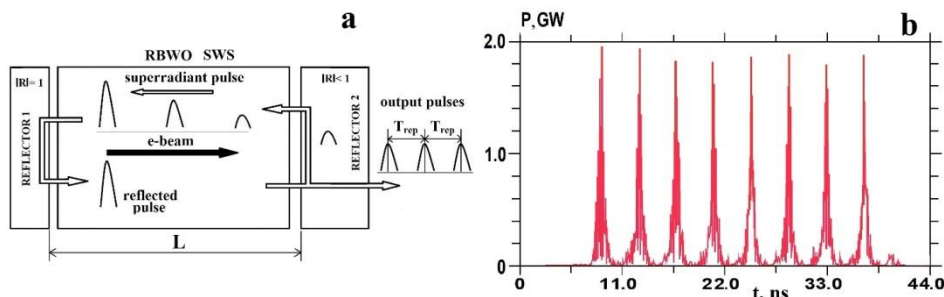


Рис. 3. Блок-схема генератора с выводом излучения в сторону коллектора электронов (а); пример 2,5-D моделирования генерации последовательности импульсов при токе электронного пучка 4.5 kA, ускоряющем напряжении 300 kV, длительности импульса тока 40 ns с фронтом 5 ns и ведущем магнитном поле 2.0 T (b). Частота следования импульсов 240 MHz, частота генерации $\approx 12,0$ GHz. Пиковые мощности УКИ около 1 GW, коэффициенты конверсии $K_{1-9} \approx 0,7$.

Fig. 3. Block diagram of a generator with radiation output towards the electron collector (a); an example of a 2.5-D simulation of the generation of a pulse sequence at an electron beam current of 4.5 kA, an accelerating voltage of 300 kV, a current pulse duration of 40 ns with a leading edge of 5 ns and a leading magnetic field of 2.0 T (b). Pulse repetition rate 240 MHz, generation frequency ≈ 12.0 GHz. Peak USP powers are about 1 GW, conversion factors $K_{1-9} \approx 0.7$

3. Экспериментальные результаты

Общий вид экспериментальной установки с системой СВЧ-регистрации, которая использовалась для тестирования генератора в разных режимах работы, представлены на рис. 4. В качестве высоковольтного источника применялся сильноточный импульсный генератор серии SINUS [9] с тройной формирующей линией (1), который производил импульсы напряжения с амплитудой до 330 kV и длительностью около 40 ns. Трубчатый релятивистский электронный пучок эмитировался с кромочного взрывоэмиссионного катода и формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией. Магнитное поле, транспортирующее пучок через электродинамическую систему СВЧ-генератора, создавалось соленоидом постоянного тока (2) с масляным охлаждением катушек. На выходе СВЧ-генератора устанавливался направленный ответвитель на основе круглого волновода (3). Для регистрации амплитуды и формы УКИ сигнал с ответвителя передавался на ламповый детектор и регистрировался осциллографом Tektronix TDS 7404 (4 GHz, 20 Gs/sec). В одном из экспериментов для регистрации радиосигналов с ответвителя дополнительно использовался осциллограф Keysight (Agilent) UXR0134A (13 GHz, 128 Gs/sec). Вывод СВЧ-излучения в открытое пространство производился через конический рупор (4) с диаметром выходного окна 200 mm. Высокочастотная кабель-

ная трасса для передачи детектированных СВЧ-сигналов калибровалась с помощью генератора Г5-84, который формировал видеоимпульсы с длительностью около 1 ns . Для передачи радиосигналов использовался высокочастотный кабель серии КС20А-13-13 длиной 6 m в комплексе с линией высокочастотных аттенуаторов.

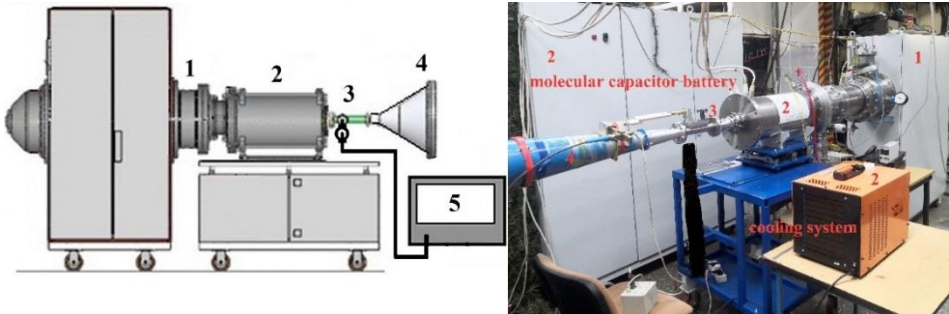


Рис. 4. Экспериментальная установка с системой СВЧ-регистрации: 1 — сильноточный импульсный генератор *SINUS* с тройной формирующей линией, 2 — соленоид с системой охлаждения и батареей молекулярных конденсаторов, 3 — направленный волноводный ответвитель с ламповым детектором, 4 — излучающий рупор, 5 — осциллограф.

Fig. 4. Experimental setup with a microwave recording system: 1 – high-current *SINUS* pulse generator with a triple shaping line, 2 – solenoid with a cooling system and a battery of molecular capacitors, 3 – directional waveguide coupler with a lamp detector, 4 – emitting horn, 5 – oscilloscope

3.1. Экспериментальный макет генератора № 1 (частота генерации 10 GHz , режим одиночного срабатывания ускорителя электронов)

При амплитуде напряжения на вакуумном диоде ускорителя электронов 270 kV , токе пучка 4.0 kA и ведущем магнитном поле 2.2 T получен режим генерации периодической последовательности УКИ (рис. 5) с длительностью на полувысоте $\approx 0.8\text{ ns}$ и частотой следования 170 MHz (период следования 5.9 ns) [6]. Такой период следования импульсов соответствует периоду обратной связи в генераторе, оцениваемому как $T = L(1/v_{gr} + 1/v_e)$ где v_e — скорость электронов в пучке, v_{gr} — групповая скорость встречной электромагнитной волны, L — длина системы (рис. 3). Центральная частота колебаний в каждом УКИ около 10 GHz . Измерения пиковой мощности УКИ с помощью направленного волноводного ответвителя, сигнал с которого поступал на ламповый детектор и обрабатывался с учетом вольт-ваттной характеристики этого детектора, дали следующие оценки: $P_1 \approx 1.4\text{ GW}$, $P_2 \approx 1.0\text{ GW}$, $P_3 \approx 1.1\text{ GW}$, $P_4 \approx 1.1\text{ GW}$, $P_5 \approx 0.8\text{ GW}$, $P_6 \approx 0.3\text{ GW}$. Коэффициенты конверсии, определяемые как

отношение пиковой мощности каждого УКИ к мощности электронного пучка в момент времени обозначенный треугольником на рис. 5, составили: $K_1 \approx 1,3$, $K_2 \approx 0,9$, $K_3 \approx 1,0$, $K_4 \approx 0,9$, $K_5 \approx 0,7$, $K_6 \approx 0,3$.

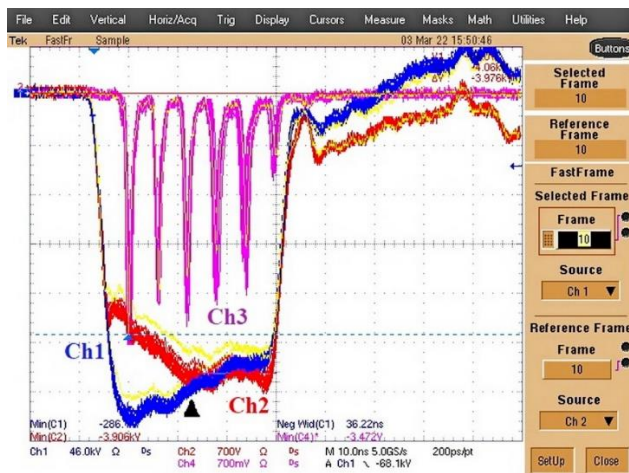


Рис. 5. Осциллограммы, зарегистрированные за 20 последовательных срабатываний ускорителя: *Ch1* — напряжение на вакуумном диоде, *Ch2* — ток вакуумного диода, *Ch3* — детектированный СВЧ-сигнал с волноводного ответвителя. Параметры электронного пучка в момент времени, выделенный треугольником: ускоряющее напряжение 270 kV, ток 4.0 kA.

Fig. 5. Oscillograms recorded for 20 consecutive operations of the accelerator: *Ch1* – voltage on the vacuum diode, *Ch2* – current of the vacuum diode, *Ch3* – detected microwave signal from the waveguide coupler. Parameters of the electron beam at the time indicated by the triangle: accelerating voltage 270 kV, current 4.0 kA

3.2. Экспериментальный макет генератора № 2 (частота генерации 12 GHz, импульсно-периодический режим работы ускорителя электронов)

При амплитуде напряжения на вакуумном диоде 300 kV, токе пучка 3.8 kA и ведущем магнитном поле 1.8 T получен режим генерации периодической последовательности УКИ (рис. 6) с длительностью по половинному уровню пиковой мощности около 1 ns и частотой следования около 240 MHz (период следования около 4.0 ns). Оценки пиковой мощности УКИ в измерениях с помощью волноводного ответвителя и лампового детектора составили: первый — $P_1 \approx 0,23$ GW, второй — $P_2 \approx 0,35$ GW, третий — $P_3 \approx 0,48$ GW, четвертый — $P_4 \approx 0,56$ GW, пятый — $P_5 \approx 0,53$ GW, шестой — $P_6 \approx 0,48$ GW, седьмой — $P_7 \approx 0,51$ GW, восьмой — $P_8 \approx 0,35$ GW. Соответствующие коэффициенты конверсии (для момента времени обозначенного треугольником): $K_{1-8} \approx 0,2—0,5$.

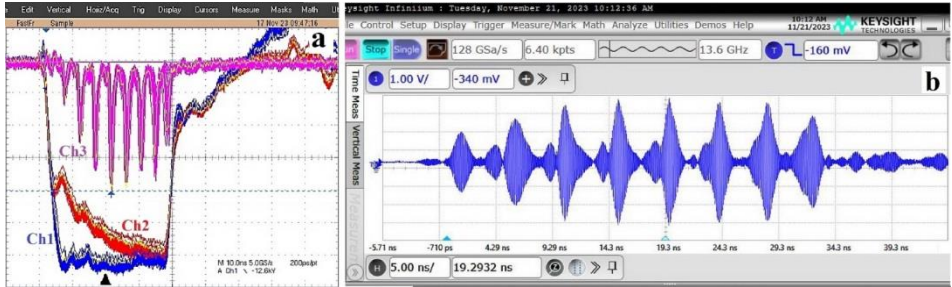


Рис. 6. Осциллограммы, полученные в режиме накопления за 30 последовательных срабатываний ускорителя электронов, работающего в режиме с частотой повторения 30 Hz (a); типичная одиночная осциллограмма последовательности радиосигналов (b).

Fig. 6. Oscillograms obtained in the accumulation mode for 30 consecutive operations of an electron accelerator operating in a mode with a repetition rate of 30 Hz (a); typical single waveform of a radio signal sequence (b)

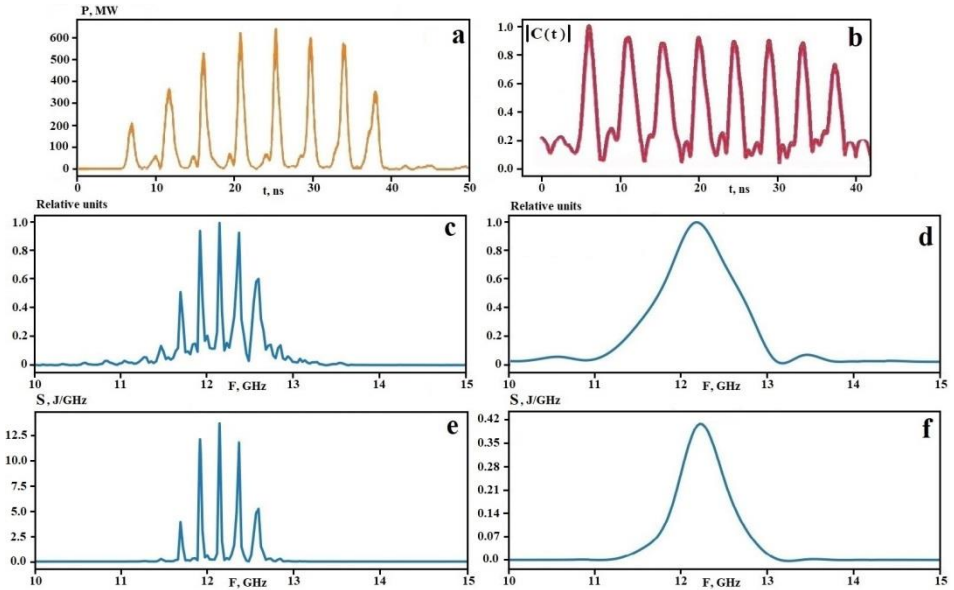


Рис. 7. Поведение усредненной за период колебания ($T_{osc}=1/F_{gen}$) мощности генерации во времени (a); огибающая модуля нормированной взаимной корреляционной функции (b); спектры всей последовательности УКИ (c) и импульса, имеющего максимальную амплитуду (d); спектральные плотности энергии всей последовательности УКИ (e) и импульса, имеющего максимальную амплитуду (f).

Fig. 7. Behavior of generation power averaged over the period of oscillation ($T_{osc}=1/F_{gen}$) over time (a); envelope of the modulus of the normalized cross-correlation function (b); spectra of the entire USP sequence (c) and the pulse with the maximum amplitude (d); spectral energy densities of the entire USP sequence (e) and the pulse having the maximum amplitude (f)

Результаты обработки последовательности радиосигналов из рис. 6b, в том числе с помощью корреляционной функции $C(t)$ и преобразования Фурье, представлены на рис. 7.

Равные частотные интервалы $\Delta F \approx 0,24 \text{ GHz}$ (рис. 7c) между спектральными линиями свидетельствуют о строгой периодичности следования СВЧ-импульсов ($T_{\text{rep}} \approx 4 \text{ ns}$). Центральная частота колебаний в каждом УКИ около 12.0 GHz (рис. 7d).

4. Заключение

Важнейшим результатом проведенных работ является экспериментальное подтверждение способа генерации периодической последовательности УКИ гигаваттного уровня СВЧ-мощности и корреляции между импульсами последовательности. Кроме того, наблюдавшееся относительно небольшое снижение пиковой мощности таких импульсов к концу последовательности может свидетельствовать о существовании ресурса для дальнейшего увеличения их числа в последовательности, как за счет перехода в более высокочастотный диапазон, так и за счет увеличения длительности импульса тока электронного пучка.

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

Благодарности

Авторы выражают благодарность К. О. Селявскому и С. А. Кицанову за помощь при проведении экспериментальной части работы. Отдельная благодарность центру коллективного пользования ТУСУРа «Импульс» за предоставленный осциллограф *Keysight (Agilent) UXR0134A* для проведения спектральных измерений. Авторы также выражают благодарность д. ф.-м. н. И. В. Пегель за полезные замечания и внимание к работе.

Список литературы

1. Боев С. Ф., Пименов П. Н., Пронин С. А., Шевырев А. В. Влияние параметров сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения на функционирование радиоэлектронных средств // Труды МАИ. 2017. Вып. 93. С. 20.
2. Бадулин Н. Н., Бацула А. П., Губанов В. П. и др. Радиолокатор с наносекундным зондирующим импульсом // Приборы и техника эксперимента. 1998. Т. 41, № 6. С. 111—114.
3. Гинзбург Н. С., Абубакиров Э. Б., Вилков М. Н. и др. Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке связанных релятивистских ламп обратной и бегущей волн, работающих в режимах усиления и нелинейного компфнеровского подавления // ЖТФ. 2018. Т. 88, вып. 8. С. 1241—1247.

4. Ginzburg N.S., Samsonov S.V., Denisov G.G. et al. Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber // Phys. Rev. Applied. 2021. Vol. 16, no. 5. 7 p.
5. Тотьменинов Е. М., Ростов В. В. Генерация последовательности мощных ультракоротких микроволновых импульсов на основе эффекта сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны с отражателями на концах пространства взаимодействия // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, вып. 1. С. 51—54.
6. Тотьменинов Е. М., Конев В. Ю., Климов А. И., Пегель И. В. Экспериментальная реализация способа генерации последовательности ультракоротких гигаваттных импульсов черенковского сверхизлучения с наносекундным периодом следования // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115, № 7-8. С. 479—483.
7. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Ростов В. В. и др. Черенковское сверхизлучение с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, вып. 6. С. 314—318.
8. Тараканов В. П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М. : Наука, 2003. 477 с.
9. Mesyats G. A., Korovin S. D., Gunin A.V. et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21. P. 197—209.

Информация об авторах

Тотьменинов Евгений Маркович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)», г. Томск, Российская Федерация.

Конев Владимир Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)», г. Томск, Российская Федерация.

Выходцев Павел Васильевич, научный сотрудник ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)», г. Томск, Российская Федерация.

The Method of Generation of a Periodic Sequence of Ultrashort Gigawatt Pulses with a Nanosecond Repetition Period in the Superradiance Mode of a Relativistic Backward Wave Oscillator

E. M. Totmeninov, V. Yu. Konev, and P. V. Vykhodtsev

*Institute of High Current Electronics, SB RAS
Academicheskyy ave., 2/3, 634055, Tomsk, Russian Federation
totm@lfe.hcei.tsc.ru*

Received: April 26, 2024
Peer-reviewed: May 2, 2024
Accepted: May 2, 2024

Abstract: A method for generating a periodic sequence of powerful ultrashort microwave pulses based on the superradiant mode of a relativistic backward wave oscillator during one pulse of a current of a high-current relativistic electron beam of nanosecond duration is proposed and implemented. Based on non-stationary numerical codes, it is shown that this mode is implemented by introducing reflections at the ends of the system of decelerating generators. The effectiveness of the method has been confirmed experimentally for generation frequencies of 10 GHz and 12 GHz. The modes of generation of ultrashort (duration about 1 ns) gigawatt microwave pulses with a repetition period in units of nanoseconds (repetition frequency of hundreds of megahertz) are obtained. The conversion coefficients of such pulses, defined as the ratio of the peak power of microwave radiation to the power of the electron beam, reached values above one. In the experiment, a correlation was observed between the sequence of pulses and their strict periodicity.

Keywords: relativistic backward wave oscillator, superradiant mode, high current electronic beam, numerical simulation.

Sources of financing: The work was funded within the framework of the State Assignment by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Institute of High Current Electronics SB RAS (FWRM-2021-0002).

For citation (IEEE): E. M. Totmeninov, V. Yu. Konev, and P. V. Vykhodtsev, "The Method of Generation of a Periodic Sequence of Ultrashort Gigawatt Pulses with a Nanosecond Repetition Period in the Superradiance Mode of a Relativistic Backward Wave Oscillator," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 81–92, 2024, doi: 10.xxxxx/2587-9936.2024.07.1.06. (In Russ.).

References

- [1] S. Boev, P. Pimenov, S. Pronin, and A. Shevyrev, "The Influence of Parameters of the Ultra-Short Pulse of Electromagnetic Radiation on the Functioning of Radio-Electronic Devices," *Trudy MAI*, no. 93, 20 p. (In Russ.).

- [2] N. N. Badulin, A. P. Batsula, A. I. Mel'nikov et al. "A Radar with a Nanosecond Sounding Puls," *EInstruments and Experimental Techniques*, 1998. vol. 41, no. 6, pp. 847–849.
- [3] N. S. Ginzburg, E. B. Abubakirov, M. N. Vilkov, et al. "Generation of a Periodic Sequence of High-Power Ultrashort Pulses in a Chain of Coupled Backward-Wave and Traveling-Wave Tubes Operating in the Regimes of Amplification and Nonlinear Kompfner Suppression," *Tech. Phys.*, vol. 63, pp. 1205–1211, (2018), doi: 10.1134/S1063784218080078.
- [4] N. S. Ginzburg, S. V. Samsonov, G. G. Denisov et al. "Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber," *Phys. Rev. Applied*, vol. 16, iss. 5, pp. 054045, 2021, doi: 10.1103/PhysRevApplied.16.054045.
- [5] E. M. Totmeninov and V. V. Rostov, "Generation of a sequence of powerful ultrashort microwave pulses based on the effect of superradiance of a relativistic back-ward wave oscillator with reflectors at the ends of the interaction space," *Technical Physics Letters*, vol. 47, no. 1, pp. 46–49, 2021, doi: 10.21883/PJTF.2021.01.50460.18527.
- [6] E. M. Totmeninov, V. Y. Konev, A. I. Klimov et al. "Experimental Implementation of the Method of Generation of a Sequence of Ultrashort Gigawatt Cherenkov Superradiance Pulses with a Nanosecond Repetition Period," *Jetp Lett.*, vol. 115, pp. 444–448, 2022, doi: 10.1134/S0021364022100356.
- [7] A. A. El'chaninov, S. D. Korovin, V. V. Rostov et al. "Cherenkov superradiance with a peak power higher than electron flow power," *Jetp Lett.*, vol. 77, pp. 266–269, 2003, doi: 10.1134/1.1577754.
- [8] V. P. Tarakanov, *Mathematical modeling. Problems and results*. M.: Nauka, 2003. (In Russ.).
- [9] G. A. Mesyats, S. D. Korovin, A. V. Gunin et al. "Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines," *Laser Part. Beams*, vol. 21, pp. 197–209, 2003, doi: 10.1017/S0263034603212076.

Information about the authors

Eugene M. Totmeninov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, researcher of the FSBSI "Institute of High Current Electronics SB RAS", Tomsk, Russian Federation.

Vladimir Yu. Konev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher of the FSBSI "Institute of High Current Electronics SB RAS", Tomsk, Russian Federation.

Pavel V. Vykhodtsev, researcher of the FSBSI "Institute of High Current Electronics SB RAS", Tomsk, Russian Federation.