

13

Генерация последовательности мощных ультракоротких микроволновых импульсов на основе эффекта сверхизлучения релятивистской лампы обратной волны с отражателями на концах пространства взаимодействия

© Е.М. Тотьменинов, В.В. Ростов

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

Поступило в Редакцию 24 августа 2020 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2020 г.

Принято к публикации 29 сентября 2020 г.

В численном эксперименте на основе нестационарных кодов показано, что введение отражений на концах замедляющей системы релятивистской лампы обратной волны, работающей в режиме сверхизлучения, обеспечивает условия для формирования последовательности мощных ультракоротких СВЧ-импульсов в течение одиночного импульса тока. Частота повторения импульсов задается временем прохода по цепи обратной связи и может составлять ~ 100 МГц. Коэффициент конверсии, определяемый как отношение пиковой мощности ультракороткого импульса к мощности электронного пучка, составляет для первого (основного) импульса около 3 и снижается до ~ 2 для последующих импульсов.

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

DOI: 10.21883/PJTF.2021.01.50460.18527

В последнее время появился ряд теоретических работ [1–3], посвященных исследованию возможности генерации периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов (УКИ) на основе различных схем с использованием релятивистских ламп обратной волны (РЛОВ) и бегущей волны. Исследуемые схемы генераторов УКИ содержат активный элемент (усилитель) и нелинейный насыщающийся поглотитель в цепи обратной связи. Моделирование работы таких приборов показало, что частота повторения УКИ может достигать сотен МГц, а их пиковая мощность превышать мощность питающих электронных пучков.

Предпосылки для возбуждения периодической последовательности УКИ наблюдались и ранее в исследованиях РЛОВ, работающей в режиме сверхизлучения (СИ), когда резонансный рефлектор для отражения импульсов не применялся, а вывод осуществлялся в направлении входа пучка (пучок проходил через стенку цилиндрического волновода) [4]. Однако коэффициенты конверсии УКИ, следующих за основным (первым) импульсом, оказывались существенно меньше единицы с постепенным переходом генерации к режиму, близкому к хаотическому, что предопределило низкий интерес к дальнейшим исследованиям в данном направлении. Такая динамика объяснялась наличием значительного количества замедленных электронов (в том числе меняющих направление движения), остающихся в системе от предыдущего акта взаимодействия. Влияние их объемного заряда может приводить к смещению резонансной частоты для основного пучка. Также необходимо учитывать синхронное и несинхронное взаимодействие элект-

тронов с гармониками рабочей волны, роль которого в ускорении „хаотизации“ могла возрастать с применением рефлектора для вывода импульсов в направлении электронного коллектора. В настоящей работе исследована схема, в которой введено частичное отражение импульса СИ от выхода РЛОВ. Показано, что данный подход также обеспечивает условия для получения режима генерации периодической последовательности УКИ с частотой повторения, задаваемой временем прохода по цепи обратной связи. Необходимо отметить, что нестационарные режимы работы релятивистской ЛОВ с концевыми отражениями, в том числе режимы генерации квазипериодических последовательностей коротких импульсов, были ранее подробно изучены в работах [5–7].

Блок-схема исследуемого генератора представлена на рис. 1. На выходе генератора расположен элемент, отражающий часть ($|R| < 1$) излучаемой СВЧ-мощности обратно в область пространства взаимодействия, а на его коллекторном конце, где осаждается электронный пучок, осуществляется полное отражение ($|R| = 1$) падающей СВЧ-мощности в режиме короткого замыкания. Анализ работы такой схемы начнем с использованием простейшей нестационарной модели РЛОВ [8] в приближении ультрарелятивистских энергий электронного пучка ($\gamma_0 \gg 1$, где γ — фактор Лоренца), однонаправленного движения электронов, дополненной соответствующими начальными условиями:

$$\partial\theta^2/\partial\xi^2 = (1 + v\partial\theta/\partial\xi)^{3/2} \operatorname{Re} \left\{ f(\xi) A e^{i\theta} - i \sum \sigma_n J_n e^{in\theta} \right\},$$

$$\partial A/\partial \tau - \partial A/\partial \xi = f(\xi)J_n, \quad J_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} d\theta,$$

$$\theta(\tau, \xi=0) = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \partial\theta/\partial\xi|_{\tau, \xi=0} = 0, \quad A|_{\tau=0} = A_0(\xi).$$

$$A(\tau, \xi_k) = \begin{cases} 0, & \tau \leq T_{fb} + \tau_d, \\ A(\tau - \tau_d, \xi = 0)R, & \tau > T_{fb} + \tau_d. \end{cases}$$

С целью перехода к независимым переменным здесь использована следующая нормировка [7]: $\tau = \omega_0 C t' / (1 + v_{\parallel} / v_{gr})$, $t' = t - z / v_{\parallel}$, $\xi = \omega_0 C z / v_{\parallel}$, $\xi_k = \omega_0 C L / v_{\parallel}$, $C = (e J_b Z_{-1} / 2 m c^2 \gamma_0^3)^{1/3}$, где v_{\parallel} , v_{gr} — скорость частиц и групповая скорость встречной электромагнитной волны, ω_0 — частота колебаний, соответствующая точному синхронизму частиц и пространственной гармоники волны, e и m — заряд и масса электрона соответственно, J_b — ток пучка, Z_{-1} — сопротивление связи с (-1) -й гармоникой встречной волны, L — полная длина системы, $\nu = 2C\gamma_0^2$, σ_n — весовой коэффициент n -й гармоники пространственного заряда, $R = |R| \arg(\varphi_r)$ — комплексный коэффициент отражения волны от выхода генератора, $A = e \tilde{A}(t, z) / m c \omega_0 C^2 \gamma_0^2$, $\tilde{A}(t, z)$ — медленно меняющаяся во времени t и по продольной координате z амплитуда (-1) -й пространственной гармоники встречной волны в области пучка $E_z = \text{Re}(\tilde{A}(t, z) \exp(i\omega_0(t - z(\bar{h} - h_{\parallel})/\omega_0)))$, h_{\parallel} — продольное волновое число фундаментальной гармоники, $\bar{h} = 2\pi/d$, d — период гофрировки волновода. Функция $f(\xi)$ описывает профиль синхронной гармоники вдоль замедляющей системы и удовлетворяет условию нормировки $\int_0^{\xi_k} f(\xi) d(\xi) = \xi_k$ (в случае однородной гофрировки $f = 1$), T_{fb} — нормированное время прохода по цепи обратной связи (так как $T = L(1/v_{gr} + 1/v_{\parallel})$, $T_{fb} = \xi_k$). Для регистрации характеристик УКИ вводится коэффициент конверсии, который определяется как отношение мощности излучения, выводимой в нагрузку, к мощности электронного пучка: $K = P_{peak} / P_{beam} = |A(\tau, \xi = 0)|^2 (1 - |R|^2) \nu / 8$.

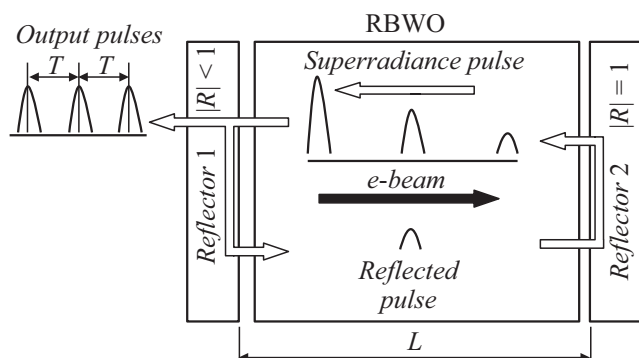


Рис. 1. Блок-схема СВЧ-прибора для получения последовательности УКИ на основе РЛОВ, работающей в режиме сверхизлучения с выводом излучения в сторону катодного узла. T — период следования импульсов, L — длина системы.

Определим нормированное время прохождения отраженного импульса от выхода генератора к коллектору (τ_d). Будем следить за областью с максимальной амплитудой. Пусть импульс начинает распространяться из точки $z = 0$ в момент времени $t'_1 = t_1$. В точку $z = L$ эта фракция придет в момент времени $t'_2 = t_2 - L/v_{\parallel}$. Поскольку $t_2 - t_1 = L/v_{gr}$, имеем $\tau_d = \xi_k (v_{\parallel} / v_{gr} - 1) / (1 + v_{\parallel} / v_{gr})$. Учитывая несинхронный характер взаимодействия электронов с частично отраженной со стороны выхода генератора волной, полагаем, что обменом энергии между ними можно пренебречь.

Расчеты показали, что в рамках данной модели устойчивые режимы генерации последовательности УКИ реализуются в случае, когда длина генератора превышает стартовую не более чем в 3 раза. В оптимальном случае при $|R| = 0.2$ коэффициенты конверсии УКИ составляют $K \approx 1.0 - 1.2$, а область рабочих задержек $\tau_d < 0.1$ (рис. 2). При увеличении длины генератора устойчивый режим генерации первого импульса СИ сохраняется, происходит рост параметра K_1 (коэффициент конверсии для первого импульса последовательности), однако поведение импульсов, следующих за основным, становится неустойчивым к малым изменениям параметров расчета. Аналогично [3] по существующей последовательности УКИ можно вычислить нормированную взаимную корреляционную функцию $C(\tau)$ между первым (тестовым) импульсом СИ $A_1(\tau)$ и полной последовательностью импульсов $A(\tau)$ (рис. 2, b):

$$C(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T A_1(\tau') A^*(\tau' - \tau) d\tau' \times \left(\frac{1}{T} \int_0^T |A_1(\tau')|^2 d\tau' \frac{1}{T} \int_{\tau}^{T+\tau} |A(\tau')|^2 d\tau' \right)^{-1/2}.$$

Далее представлены результаты нестационарного численного моделирования исследуемой схемы с помощью PIC-кода KARAT [9] (рис. 3). Рабочий тип волны TM_{01} . Длительность УКИ по половинному уровню от их пиковой мощности составила около 0.5 ns. Период следования импульсов задается временем прохода по цепи обратной связи и составляет около 7 ns. Схема продемонстрировала свою устойчивость к вариации длительности фронта импульса тока пучка в диапазоне 2.5–3.5 ns, а также в пределах ускоряющих напряжений 330 ± 30 kV.

Наиболее заметное снижение коэффициента конверсии после 30 ns связано с влиянием обратного потока сильно заторможенных электронов, которые образуются в процессе формирования каждого УКИ. Кумулятивное накопление отрицательного объемного заряда в области диода (рис. 3, b) приводит к постепенному изменению условий формирования электронного пучка, следствием которого является заметное снижение тока до 5.7 kA

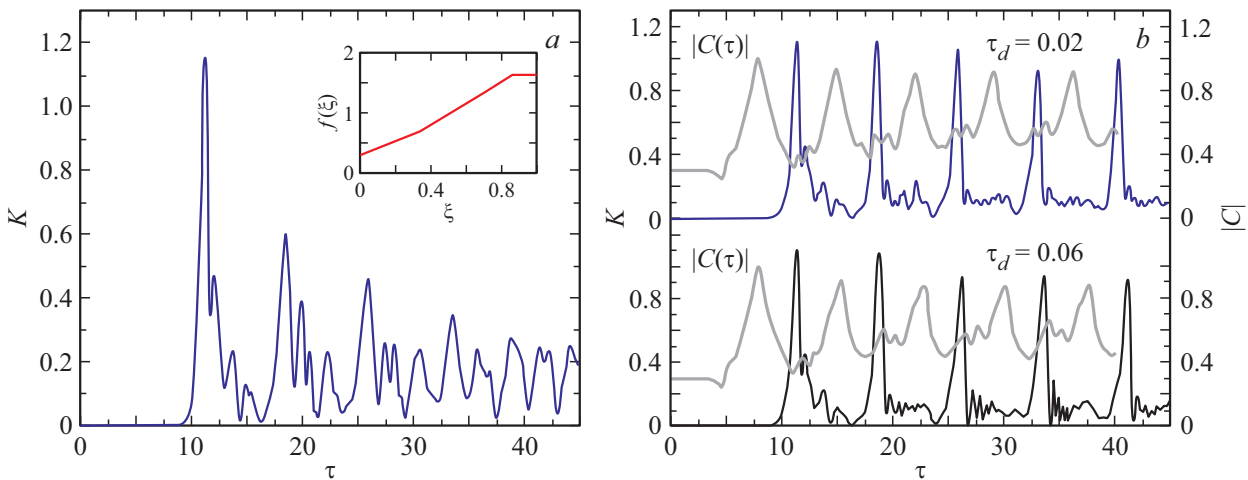


Рис. 2. *a* — режим одиночного импульса СИ при $|R| = 0$, *b* — режим генерации последовательности УКИ для случая $|R| = 0.2$ и $\arg(\varphi_r) = 0$. Расчеты проведены для параметров $\xi_k = 6.6$, $\nu = 0.3$, $\sigma_1 = 1.5$, $\xi_{sr} = 2.37$ (стартовая длина генератора). На вставке (часть *a*) показан профиль $f(\xi)$.

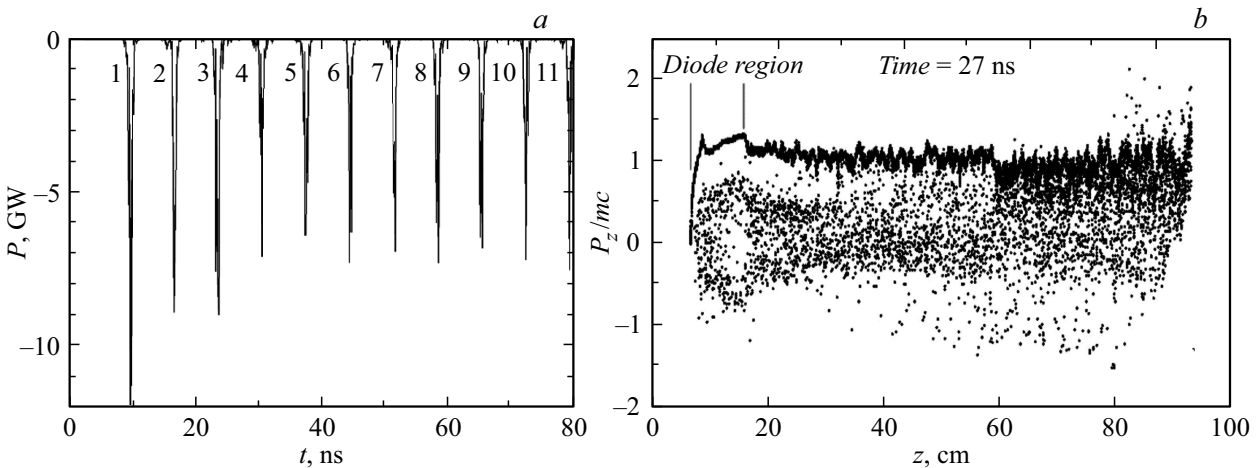


Рис. 3. *a* — последовательность УКИ с несущей частотой 10 GHz для следующих расчетных параметров: напряжение в диоде 330 kV, ток пучка 6.6 kA, длительность импульса тока пучка 80 ns с фронтом 3 ns, ведущее магнитное поле 4 T. Частота повторения УКИ 148 MHz. Коэффициенты конверсии УКИ: $K_1 = 2.73$, $K_2 = 2.07$, $K_3 = 2.08$, $K_4 = 1.62$, $K_5 = 1.47$, $K_{6-11} = 1.6-1.7$. *b* — фазовый портрет электронного пучка.

при росте напряжения на диоде до 340 kV. В результате происходит отстройка от оптимальной настройки системы по параметрам электронного пучка. Возможно, по этой же причине начиная с шестого импульса снижается стабильность периодической генерации. В зависимости от начальных параметров расчета коэффициенты конверсии некоторых УКИ могут снижаться до уровня 1.3 при сохранении периодичности следования импульсов. Можно предположить, что в условиях реального эксперимента расширение катодной и коллекторной плазмы будет частично компенсировать эффект, связанный с накоплением отрицательного заряда в области вакуумного диода.

Коэффициенты конверсии, полученные на основе численного моделирования с помощью PIC-кода KARAT,

превышают соответствующие значения, полученные в рамках ультрарелятивистской модели. По-видимому, это связано с тем, что ультрарелятивистская модель в отличие от PIC-моделирования не описывает процесс глубокого торможения частиц вплоть до их полной остановки.

Обе модели продемонстрировали, что введение дозированных отражений СВЧ-мощности от катодного конца РЛОВ, работающей в режиме сверхизлучения, приводит к стабилизации возбуждения последовательности УКИ и увеличению их коэффициентов конверсии. Выявленные закономерности сохраняются и при моделировании с использованием кода KARAT, где в отличие от нестационарной ультрарелятивистской модели учитываются наличие в системе сильно замедленных электронов и

обмен энергией между отраженным импульсом и электронным пучком.

Благодарности

Авторы выражают благодарность И.В. Пегелю за внимание к этой работе и полезные замечания, а также А.А. Ельчанинову за вклад в написание программы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, Письма в ЖТФ, **41** (17), 44 (2015).
- [2] Н.С. Гинзбург, Э.Б. Абубакиров, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, Письма в ЖТФ, **43** (18), 47 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.18.45033.16444b
- [3] 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
- [4] A.A. Eltchaninov, S.D. Korovin, V.V. Rostov, I.V. Pegel, G.A. Mesyats, S.N. Rukin, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, N.S. Ginzburg, Laser Part. Beams, **21** (2), 187 (2003). DOI: 10.1017/S0263034603212064
- [5] Н.М. Рыскин, В.Н. Титов, Изв. вузов. Радиофизика, **44** (10), 860 (2001).
- [6] Р.М. Розенталь, Н.С. Гинзбург, А.С. Сергеев, Изв. вузов. Радиофизика, **50** (12), 1043 (2007).
- [7] B. Levush, T.M. Antonsen, A. Bromborsky, W.-R. Lou, Y. Carmel, IEEE Trans. Plasma Sci., **20** (3), 263 (1992). DOI: 10.1109/27.142828
- [8] Н.С. Гинзбург, С.П. Кузнецов, Т.Н. Федосеева, Изв. вузов. Радиофизика, **21** (7), 1037 (1978).
- [9] В.П. Тараканов, *Математическое моделирование. Проблемы и результаты* (Наука, М., 2003), с. 456–476.