

Экспериментальная реализация способа генерации последовательности ультракоротких гигаваттных импульсов черенковского сверхизлучения с наносекундным периодом следования

Е. М. Тотменинов¹⁾, В. Ю. Конев¹⁾, А. И. Климов¹⁾, И. В. Пегель¹⁾

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

Поступила в редакцию 15 марта 2022 г.

После переработки 15 марта 2022 г.

Принята к публикации 15 марта 2022 г.

В эксперименте с релятивистской лампой обратной волны, имеющей волновые отражатели на краях области электронно-волнового взаимодействия, получена генерация периодической последовательности ультракоротких импульсов сверхизлучения на протяжении импульса тока электронного пучка длительностью около 40 нс. Период следования импульсов задавался временем электронно-волновой обратной связи и составил 5.9 нс, что соответствовало частоте повторения 170 МГц, при длительности по полувывсоте около 0.8 нс. Частота СВЧ-колебаний 10 ГГц. Пиковая мощность импульсов $0.8 \div 1.3$ ГВт. Соответствующие коэффициенты конверсии, определяемые как отношение пиковой мощности ультракороткого СВЧ-импульса к мощности электронного пучка, составили $0.7 \div 1.2$.

DOI: 10.31857/S1234567822080031, EDN: fmehkm

Введение. Интерес к источникам мощного микроволнового излучения в значительной мере связан с исследованиями в области электромагнитной совместимости электронных устройств, а также разработками для радиоэлектронной борьбы. Для этих целей используются главным образом импульсно-периодические релятивистские СВЧ-генераторы и усилители, работающие либо в режиме квазистационарной генерации (длительность микроволнового импульса близка к длительности тока питающего электронного пучка и составляет ~ 100 периодов колебаний), либо в режиме ультракоротких импульсов (УКИ) [1–3] с длительностью всего в несколько периодов колебания. В последнем случае пиковая мощность УКИ может превышать мощность электронного пучка. В обоих случаях максимальная частота повторения СВЧ-импульсов определяется возможностями источника высоковольтных наносекундных импульсов, подаваемых на вакуумный диод СВЧ-генератора, в котором генерируется сильноточный электронный пучок, и, как правило, ограничена величиной ~ 1 кГц. В ряде теоретических работ [4–6] были предложены подходы и схемы, позволяющие существенно увеличить частоту следования УКИ. Так, в работах [4, 5] исследованы комбинации реля-

тивистских ламп обратной волны (РЛОВ) и бегущей волны, одна из которых служила активным элементом (усилителем), а другая играла роль нелинейного насыщающегося поглотителя в цепи обратной связи. Такая схема получила экспериментальное подтверждение в работе [7]. Другой подход [6] основан

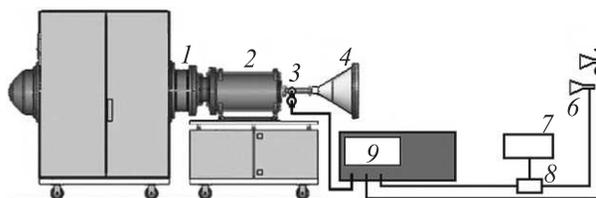


Рис. 1. (Цветной онлайн) 1 – Сильноточный импульсный генератор SINUS с тройной формирующей линией; 2 – импульсный соленоид с расположенной внутри него электродинамической системой генератора УКИ; 3 – направленный волноводный ответвитель в комплексе с ламповым детектором #1; 4 – излучающий рупор; 5 – приемная антенна в комплексе с ламповым детектором #2; 6 – приемная антенна для измерения спектра генерации; 7 – генератор опорной частоты Г4-83; 8 – смеситель; 9 – осциллограф Tektronix TDS 7404 (4 ГГц, 20 Гвыб/с)

на введении частичного отражения УКИ от выхода РЛОВ, срабатывающей в режиме сверхизлучения. Численное моделирование показало, что частота сле-

¹⁾ totm@lfe.hcei.tsc.ru; honour@vtomske.ru; klimov.1955@inbox.ru; pegel@lfe.hcei.tsc.ru

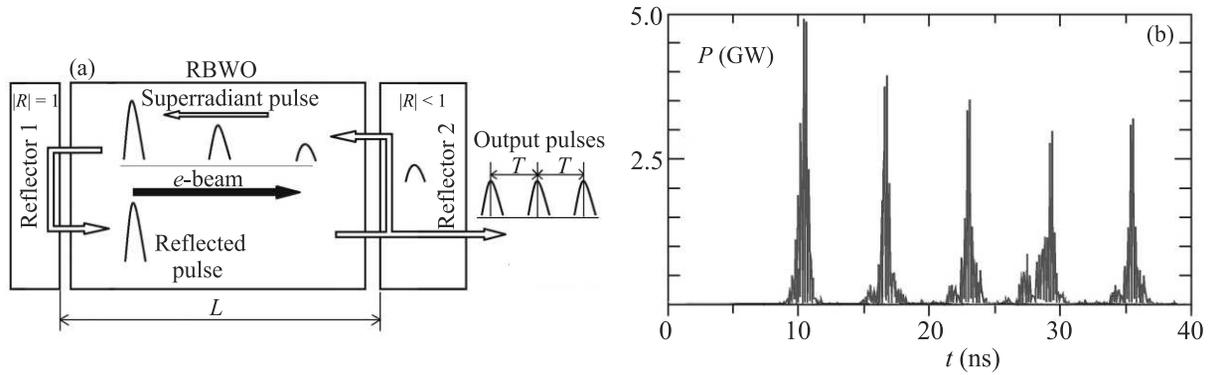


Рис. 2. (Цветной онлайн) (а) – Блок-схема генератора последовательности УКИ на основе РЛОВ, работающей в режиме сверхизлучения с выводом излучения в сторону коллектора электронов ($|R|$ – коэффициент отражения). (б) – Результат численного моделирования генерации последовательности УКИ с несущей частотой 10 ГГц при токе электронного пучка 4.0 кА, ускоряющем напряжении 270 кВ, длительности импульса тока 40 нс с фронтом 3 нс, ведущем магнитном поле 2.0 Тл. Расчетная частота следования УКИ 160 МГц. Пиковые мощности пяти последовательных УКИ (ГВт): 2.5, 2.0, 1.8, 1.5, 1.6. Соответствующие коэффициенты конверсии K : 2.3, 1.9, 1.7, 1.4, 1.5

дования УКИ в таких приборах определяется характерным временем в цепи обратной связи “волновой импульс–электронный пучок” и достигает сотен мегагерц, а пиковая мощность УКИ превышает мощность питающего электронного пучка. Заметим, что для оценки эффективности таких режимов используют понятие коэффициента конверсии (K) [2], определяемого как отношение пиковой мощности УКИ к мощности электронного пучка.

В настоящей работе представлены результаты эксперимента по генерации периодической последовательности УКИ в рамках подхода, описанного в работе [6]: сверхизлучательная РЛОВ с волновыми отражателями на краях пространства взаимодействия. Предварительно выполненный численный эксперимент показал, что в течение импульса тока пучка формируется периодическая последовательность УКИ с частотой следования около 200 МГц, при этом $K \approx 2$.

Экспериментальная установка и система регистрации СВЧ-сигналов. Общий вид экспериментальной установки с системой СВЧ-регистрации схематически представлен на рис. 1. В качестве источника высоковольтных импульсов использован сильноточный импульсный генератор серии SINUS [8] с тройной формирующей линией (1), формирующий импульсы напряжения с амплитудой до 330 кВ и длительностью на полувысоте 36 нс. Трубчатый релятивистский электронный пучок генерируется в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией с кромочным взрывоэмиссионным катодом диаметром 35 мм. Для транспортировки пучка через электродинамическую систему СВЧ-генератора использован импульсный соленоид (2) с длиной однородного

участка магнитного поля около 600 мм. Принцип работы РЛОВ в режиме сверхизлучения основан на накопительном отборе энергии у электронов ультракоротким электромагнитным импульсом, распространяющимся навстречу электронному потоку [2, 3]. Исследуемая конструкция электродинамической системы (рис. 2) была изготовлена на основе результатов численного моделирования с использованием осесимметричной 2.5-D версии полностью электромагнитного PiC-кода KARAT [9]. Конструкция имела два рефлектора, один из которых располагался на входе в замедляющую систему со стороны катодного узла и обеспечивал полное отражение падающей СВЧ-волны. Второй рефлектор, расположенный на выходе генератора со стороны коллектора электронов, возвращал в замедляющую систему около 5% мощности. Наличие такой цепи обратной связи приводит к тому, что каждый сформировавшийся УКИ вызывает зарождение следующего импульса. Замедляющая система генератора представляла собой набор из 45 гофр с периодом 12 мм и средним диаметром $\approx 1.3 \lambda$, где λ – длина волны излучения. Глубина гофрировки плавно увеличивалась от катодного края системы к коллекторному. Последние семь гофр имели одинаковую амплитуду и составляли однородный участок, на котором и зарождается каждый УКИ. На выходе СВЧ-генератора устанавливался направленный ответвитель на основе круглого волновода (3), который в комплексе с ламповым детектором #1 использовался для регистрации амплитуды и формы УКИ в выходном волноводном тракте. Переходное затухание ответвителя измерялось в диапазоне частот $9 \div 12$ ГГц с помощью анализатора цепей

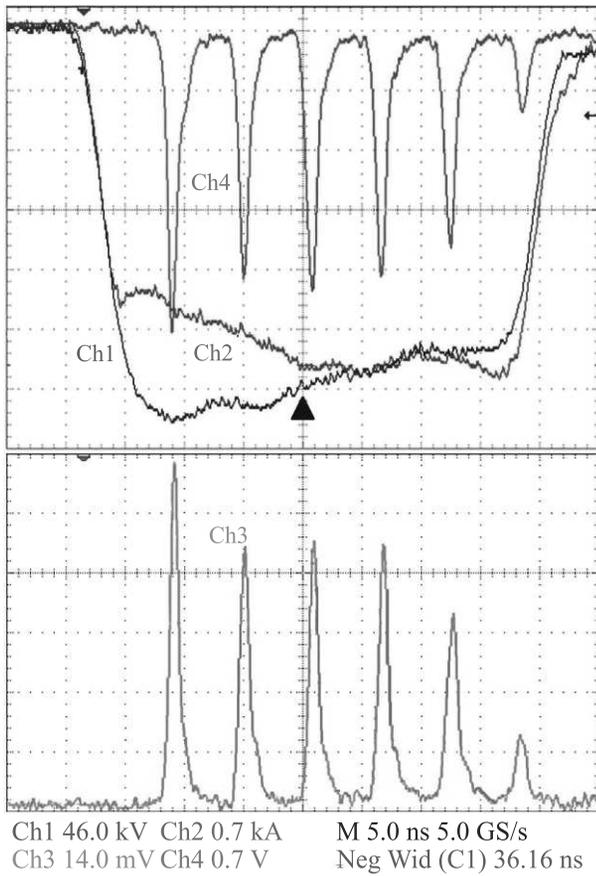


Рис. 3. (Цветной онлайн) Осциллограммы, демонстрирующие эффект генерации периодической последовательности УКИ: Ch1 – напряжение на вакуумном диоде; Ch2 – ток вакуумного диода; Ch3 – детектированный СВЧ-сигнал с волноводного ответвителя; Ch4 – детектированный СВЧ-сигнал с приемной антенны, находящейся в максимуме плотности потока мощности. Параметры электронного пучка в момент времени, выделенный треугольником: ускоряющее напряжение 270 кВ, ток 4.0 кА

Agilent 8719 ET (50 МГц ÷ 12.5 ГГц) и составило 69 ÷ 71 дБ. Для вывода излучения использовался конический рупор (4) с диаметром выходного окна около 200 мм. Приемные антенны в виде открытого конца прямоугольного волновода с геометрическим сечением 23 × 10 мм располагались на расстоянии 4.0 м от апертуры излучающего рупора и использовались для регистрации амплитуды и формы УКИ в открытом пространстве (антенна 5 в комплексе с ламповым детектором #2) и спектральных измерений (антенна 6). Спектр излучения определялся гетеродинным методом (генератор 7 и смеситель 8 на рис.1) путем обработки сигнала промежуточной частоты осциллографом серии Tektronix MSO 64 (6 ГГц, 25 Гвыб/с) с помощью быстрого

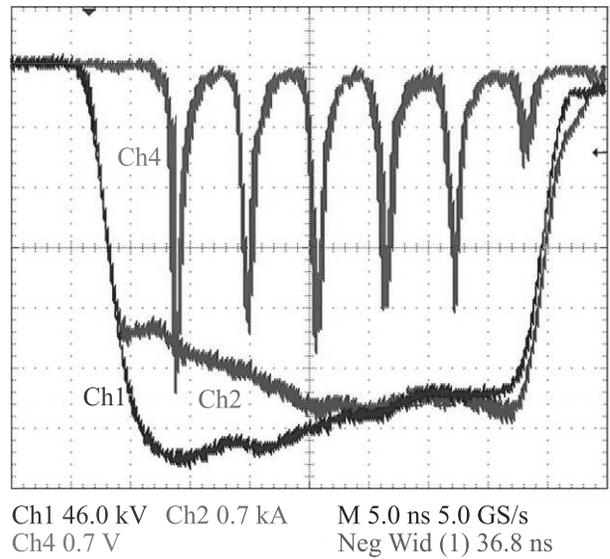


Рис. 4. (Цветной онлайн) Осциллограммы, полученные в режиме накопления за 20 последовательных срабатываний ускорителя электронов

преобразования Фурье. Область антенных измерений была отделена от окружающего пространства СВЧ-поглотителями. Для визуального контроля пространственного распределения плотности потока мощности СВЧ-излучения использовалось газоразрядное индикаторное табло из неоновых ламп. Высокочастотные кабельные трассы (кабель РК50-4-47) калибровались с помощью генератора Г5-84, который формировал видеоимпульсы с длительностью на полувысоте около 1 нс.

Результаты эксперимента. При амплитуде напряжения на вакуумном диоде ускорителя электронов 270 кВ, токе пучка 4.0 кА и ведущем магнитном поле 2.2 Тл получен режим генерации периодической последовательности УКИ (рис. 3) с длительностью на полувысоте ≈ 0.8 нс и частотой следования 170 МГц (период следования 5.9 нс). 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. 2). В серии из 20 импульсов максимальный разброс амплитуд УКИ не превышал 15% (рис. 4). Частота колебаний в каждом УКИ – около 10 ГГц (рис. 5).

Пиковая мощность в первом УКИ, полученная интегрированием пространственного распределения плотности потока мощности (которое соответствовало волне E_{01}), составила $P_1 = 1.3 \pm 0.2$ ГВт. Зная пиковые амплитуды остальных УКИ и вольт-ваттную

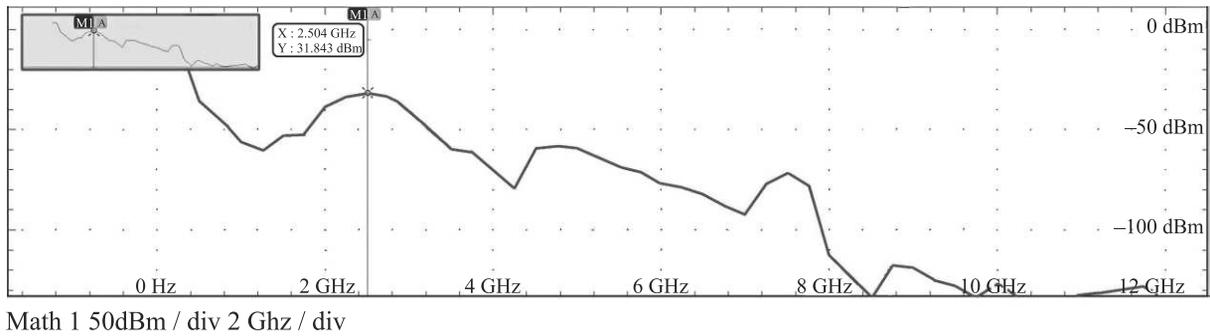


Рис. 5. (Цветной онлайн) Спектр высокочастотных колебаний, измеренный для первого УКИ (аналогичные спектры регистрировались для остальных УКИ). Частота колебаний $F = F_{\text{get}} + \Delta F$, где $F_{\text{get}} \approx 7.5$ ГГц – частота гетеродина, $\Delta F \approx 2.5$ ГГц – промежуточная частота

характеристику лампового детектора, можно оценить их пиковые мощности: $P_2 = 1.0 \pm 0.2$ ГВт, $P_3 = 1.1 \pm 0.2$ ГВт, $P_4 = 1.0 \pm 0.2$ ГВт, $P_5 = 0.8 \pm 0.1$ ГВт, $P_6 = 0.2 \pm 0.03$ ГВт. Коэффициенты конверсии определим как отношение пиковой мощности каждого УКИ к мощности электронного пучка в момент времени, выделенный треугольником на рис. 3: $K_1 = 1.2 \pm 0.2$, $K_2 = 0.9 \pm 0.2$, $K_3 = 1.0 \pm 0.2$, $K_4 = 0.9 \pm 0.2$, $K_5 = 0.7 \pm 0.1$, $K_6 = 0.2 \pm 0.03$. Свечение панели из газоразрядных ламп под действием СВЧ-излучения имело вид кольца.

Одновременно выполнялось независимое измерение мощности излучения с помощью установленного в выходном волноводе генератора направленного волноводного ответвителя, сигнал с которого поступал на ламповый детектор #1 и обрабатывался с учетом вольт-ваттной характеристики этого детектора. Измерение дало следующие оценки для пиковых мощностей УКИ: $P_1 = 1.4 \pm 0.2$ ГВт, $P_2 = 1.0 \pm 0.2$ ГВт, $P_3 = 1.1 \pm 0.2$ ГВт, $P_4 = 1.1 \pm 0.2$ ГВт, $P_5 = 0.8 \pm 0.1$ ГВт, $P_6 = 0.3 \pm 0.04$ ГВт.

В отдельной серии экспериментов с регистрацией сигналов с помощью ответвителя выполнялось измерение энергии СВЧ-излучения с использованием вакуумного калориметра [10], который устанавливался непосредственно за ответвителем. Серия из нескольких измерений, выполненных при указанных выше настройках генератора, показала, что СВЧ-энергия, приходящаяся на одно измерение, лежит в диапазоне $8.5 \div 9.6$ Дж. Анализ соответствующих осциллограмм при допущении, что в промежутках между отдельными УКИ главным образом присутствует “шумовая” генерация на частотах вблизи 10 ГГц, дает оценку для пиковой мощности первого УКИ в $1.4 \div 1.5$ ГВт. Можно оценить и среднюю СВЧ-мощность (\bar{P}) в течение импульса электронного пучка. Полагая, что полная длительность

СВЧ-генерации составляет около 30 нс (рис. 3), имеем $\bar{P} = 8.5 \div 9.6$ Дж/30 нс = $0.28 \div 0.32$ ГВт. Энергетический КПД генератора, определяемый как отношение СВЧ-энергии к энергии электронного пучка, составил около 23 %.

Тот факт, что пиковая мощность УКИ максимальна в первом импульсе и снижается у последующих, следует связывать, во-первых, с постепенной отстройкой генератора от оптимальных параметров, происходящей в течение импульса электронного пучка вследствие расширения катодной плазмы. На последнее указывает монотонное снижение напряжения в вакуумном диоде в течение импульса (рис. 3, 4). Вероятно, свою роль также играет накопление в приборе потерявших кинетическую энергию электронов, в значительном количестве образующихся в каждом акте генерации УКИ. За время паузы между двумя УКИ такие электроны не успевают покинуть замедляющую систему, медленно дрейфуя в сторону коллектора, а с другой стороны проникая в вакуумный диод (см. рис. 3 в работе [6]). Присутствие большого количества сильно заторможенных электронов влияет и на формирование рабочего электронного пучка, и на электронно-волновое взаимодействие и, очевидно, изменяет условия генерации всех УКИ, кроме первого. Вместе с тем, это негативное влияние в рассматриваемой системе с концевыми отражателями оказывается слабее, чем в однопроходном генераторе без отражателей, в котором уже второй по счету УКИ в несколько раз уступал по мощности первому.

Заключение. Полученные экспериментальные результаты продемонстрировали работоспособность предложенной схемы генерации периодической последовательности УКИ и подтвердили корректность теоретической модели прибора. В то же время пиковые мощности УКИ и соответствующие коэффициенты конверсии, полученные в эксперименте, оказались

приблизительно вдвое меньшими, чем при осесимметричном РiС-моделировании. Наиболее вероятная причина этого – неустойчивость диокотронного типа в изначально азимутально-однородном электронном пучке, развивающаяся на протяжении всей длины его транспортировки и приводящая к азимутальной филаментации и радиальному расплыванию пучка. Сравнение автографов пучка на мишенях из капролона, размещенных на входе и выходе замедляющей системы прибора в режиме без СВЧ-генерации показало, что толщина стенки трубчатого пучка увеличивается с 0.8 мм вблизи кромки катода до 3 мм в области с максимальной глубиной гофрировки. В результате в этом месте, где и происходит зарождение УКИ, оценочная величина сопротивления связи рабочей волны E_{01} с электронным пучком оказывается примерно вдвое меньшей, чем в отсутствие неустойчивости. Азимутальная неоднородность пучка может способствовать развитию несимметричных колебаний; однако полученные в описанных экспериментах спектр генерации и распределение плотности потока мощности СВЧ-излучения говорят о селективном возбуждении моды E_{01} .

Авторы выражают благодарность А. А. Ельчанинову, К. О. Селявскому, М. Ю. Сухову, О. П. Кутенкову и С. А. Кицанову за помощь при проведении эксперимента.

1. 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).
2. A. A. Eltchaninov, S. D. Korovin, V. V. Rostov, I. V. Pegel, G. A. Mesyats, S. N. Rukin, V. G. Shpak, M. I. Yalandin, and N. S. Ginzburg, *Laser Part. Beams* **21**, 187 (2003).
3. А. А. Ельчанинов, С. Д. Коровин, И. В. Пегель, В. В. Ростов, Вопросы атомной науки и техники **3**(4), 20 (2003).
4. Н. С. Гинзбург, Э. Б. Абубакиров, М. Н. Вилков, И. В. Зотова, А. С. Сергеев, Письма в ЖТФ **43**(18), 47 (2017).
5. Н. С. Гинзбург, Э. Б. Абубакиров, М. Н. Вилков, И. В. Зотова, А. С. Сергеев, ЖТФ **88**(8), 1241 (2018).
6. Е. М. Тотьменинов, В. В. Ростов, Письма в ЖТФ **47**(1), 51 (2021).
7. N. S. Ginzburg, S. V. Samsonov, G. G. Denisov, M. N. Vilkov, I. V. Zotova, A. A. Bogdashov, I. G. Gachev, A. S. Sergeev, and R. M. Rozental, *Phys. Rev. Appl.* **16**, 054045 (2021).
8. G. A. Mesyats, S. D. Korovin, A. V. Gunin, V. P. Gubanov, A. S. Stepchenko, D. M. Grishin, V. F. Landl, and P. I. Alekseenko, *Laser Part. Beams* **21**, 197 (2003).
9. В. П. Тараканов, *Математическое моделирование. Проблемы и результаты*, Наука, М. (2003), с. 456.
10. P. V. Vykhodtsev, A. I. Klimov, V. V. Rostov, R. V. Tsygankov, and P. V. Pripitnev, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **70**, 8001506 (2021).