

13

## Генерация последовательностей коррелированных ультракоротких импульсов в лампе бегущей волны W-диапазона с цепью обратной связи

© А.А. Иванов<sup>1,2</sup>, Р.М. Розенталь<sup>1,2</sup>, Д.А. Сидоров<sup>1,3</sup>, А.В. Суховерхий<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> АО НПП „Салют“, Нижний Новгород, Россия

E-mail: daniil\_sidorov@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 15 апреля 2025 г.

Принято к публикации 23 апреля 2025 г.

Экспериментально исследована импульсная лампа бегущей волны W-диапазона с замедляющей системой типа „петляющий волновод“, охваченная цепью обратной связи. Зарегистрированы периодические последовательности коррелированных импульсов длительностью 400–500 ps с пиковой мощностью, многократно превосходящей среднюю мощность выходного излучения. Совокупность измеренных данных позволяет идентифицировать этот режим работы как самосинхронизацию нескольких продольных мод системы.

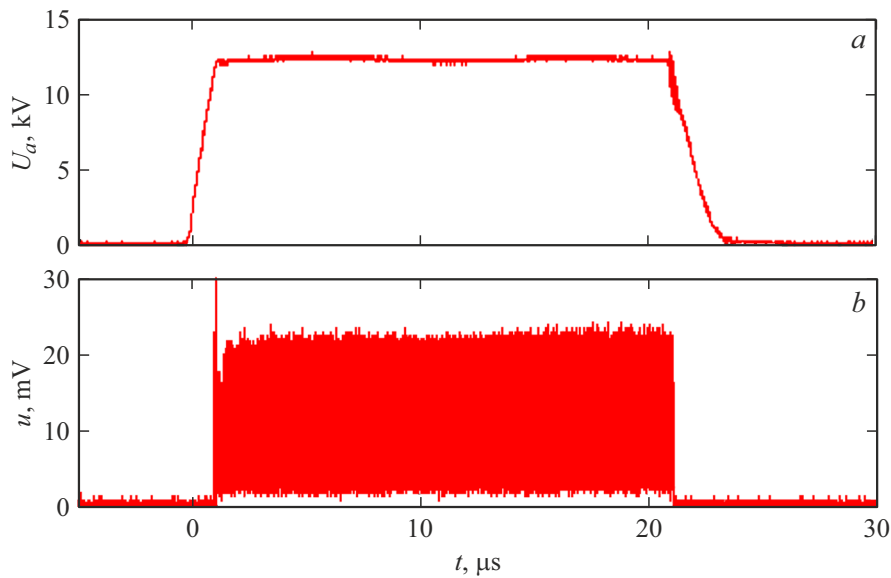
**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, генерация ультракоротких импульсов, синхронизация мод.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.14.60770.20273

Генерация коротких мощных импульсов излучения миллиметрового диапазона представляет интерес для ряда научных задач. Здесь можно указать на радиолокационные приложения, где укорочение длительности импульса позволяет увеличить пространственное разрешение [1], и ряд задач высокоинтенсивной спектроскопии [2,3]. Одним из способов генерации последовательностей коррелированных ультракоротких импульсов является использование вакуумных электронных усилителей с цепью обратной связи. Исторически первый генератор подобного типа был выполнен на основе лампы бегущей волны (ЛБВ) с насыщающимся поглотителем в цепи обратной связи [4]. Функция поглотителя (оригинальное название — экспандер) состояла в поглощении сигналов с малой амплитудой и пропускании сигналов с большой амплитудой, что позволяло обеспечить условие сфазированности отдельных мод в системе. В работе [5] такой подход использован для получения последовательностей ультракоротких импульсов большой мощности на основе гирорезонансной ЛБВ Ka-диапазона и циклотронного насыщающегося поглотителя. В [6] было показано, что в модели лампы бегущей волны черенковского типа с запаздывающей обратной связью также возможна генерация коррелированных последовательностей ультракоротких импульсов. Данный эффект обусловлен возникновением самосинхронизации мод, при котором выходное излучение состоит из нескольких эквидистантных частот с одинаковой разностью фаз. В работе [7] такие режимы генерации впервые экспериментально наблюдались в ЛБВ сантиметрового диапазона с замедляющей системой спирального типа.

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в разработке ЛБВ миллиметрового диапазона. В частности, экспериментально реализованы приборы с выходной мощностью в сотни ватт в W-диапазоне [8,9], более десяти ватт в диапазоне 260 GHz [10] и около одного ватта в диапазоне 340 GHz [11]. В отечественной практике наилучшие результаты получены в АО НПП „Салют“, где экспериментально реализовано семейство импульсных ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью до 50 W [12,13]. В настоящей работе представлены результаты исследований подобной ЛБВ, охваченной цепью обратной связи. Замедляющая система типа „петляющий волновод“ включала в себя около 60 периодов, расположенных с шагом около 1 mm. Коэффициент замедления волны в рабочей полосе частот варьировался в диапазоне от 4 до 5. Диапазон анодных напряжений лампы  $U_a$  составлял от 11.5 до 13.5 kV, ток пучка в экспериментах был равен 97 mA. При таких параметрах коэффициент усиления выбранного экземпляра ЛБВ составлял 30 dB.

Цепь обратной связи формировалась путем ответвления части выходного сигнала на уровне  $-10$  dB. Полученный сигнал через регулируемый аттенюатор и отрезок диэлектрического волновода с величиной потерь около 2 dB подавался на вход ЛБВ. Для регистрации огибающей выходного сигнала использовались полупроводниковый детектор с минимальным временем нарастания сигнала не хуже 200 ps и цифровой осциллограф с полосой пропускания 5 GHz и частотой дискретизации 20 GS/s. ЛБВ работала в импульсном режиме с длительностью импульса около 20  $\mu$ s и скважностью 100.



**Рис. 1.** Характерные осциллограммы импульса анодного напряжения (*a*) и выходного сигнала в режиме генерации последовательностей ультракоротких импульсов (*b*).

На рис. 1, *a* представлена характерная осциллограмма импульса анодного напряжения.

При превышении глубины обратной связи значения  $-30$  dB в системе возбуждались стационарные колебания с выходной мощностью около  $20$  W. При последовательном уменьшении глубины обратной связи в системе происходило возбуждение режимов периодической автомодуляции, которые переходили в режимы пиковой генерации со средней мощностью около  $8$  W. Характерная полная осциллограмма сигнала с детектора  $u(t)$  в таком режиме представлена на рис. 1, *b*.

Пиковые режимы удобно характеризовать относительной интенсивностью излучения  $I(t)$ , которая показывает относительное значение мгновенной мощности излучения относительно среднего уровня. Поскольку сигнал с детектора пропорционален квадрату амплитуды падающего излучения, соответствующее выражение принимает вид

$$I(t) = P(t)/\langle P(t) \rangle = u(t)/\langle u(t) \rangle, \quad (1)$$

где  $P(t)$  — мгновенное значение мощности сигнала, а угловые скобки означают усреднение по полной длительности сигнала. На рис. 2, *a* показаны зависимости относительной интенсивности от времени при значениях анодного напряжения  $12.8$  и  $13.06$  kV и глубине обратной связи  $-12$  dB.

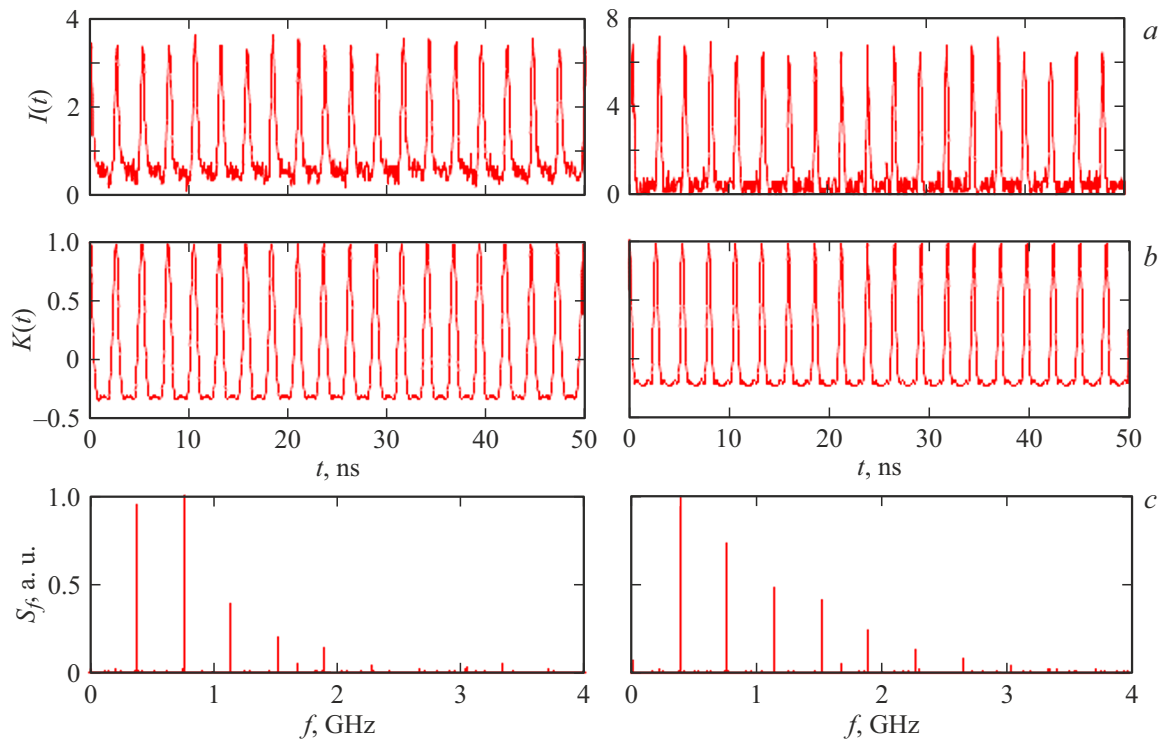
Для случая  $U_a = 12.8$  kV длительность единичного импульса, измеренная по уровню  $1/2$  от максимального значения, составляла около  $500$  ps, относительная интенсивность достигала значения  $3.6$ . Для случая  $U_a = 13.06$  kV длительность импульса уменьшалась до  $400$  ps, а относительная интенсивность увеличивалась до  $7.5$ . Период следования импульсов составлял около

$2.6$  ns. Для полученных сигналов рассчитывалась автокорреляционная функция (рис. 2, *b*), по которой определялось минимальное значение коэффициента корреляции между импульсами  $K_{\min}$ . Для случая  $U_a = 12.8$  kV соответствующее значение составило  $K_{\min} = 0.978$ , для случая  $U_a = 13.06$  kV —  $K_{\min} = 0.967$ .

Полученные режимы генерации коррелированных последовательностей импульсов можно интерпретировать как режим самосинхронизации мод. В СВЧ-приборах на основе электронных потоков впервые подобные режимы были теоретически описаны в работе [14] для модели лазера на свободных электронах с высокодобротным резонатором. В дальнейшем было высказано предположение, что в силу универсального характера использованных уравнений результаты работы [14] могут быть применимы и к другим типам электронных генераторов, в частности к генераторам на основе ЛБВ с запаздывающей обратной связью [15].

В работе [6] был сформулирован набор условий, определяющих режим синхронизации мод на основе анализа выходного сигнала. Первым условием является эквидистантность спектра. В экспериментах оно выполнялось с хорошей точностью: расстояние между соседними частотными компонентами спектра огибающей сигнала в первом случае составляло  $369.9 \pm 0.1$  MHz, во втором случае —  $377.5 \pm 0.1$  MHz (рис. 2, *c*). Оба эти значения были близки к расчетному расстоянию между продольными модами кольцевого резонатора, образованного замедляющей системой ЛБВ и цепью обратной связи. В зависимости от величины замедления указанное расстояние составляет  $370$ – $400$  MHz.

В качестве второго условия выступает близость максимального значения относительной интенсивности к теоретическим значениям. Для случая синхронизации



**Рис. 2.** Осциллограммы выходного сигнала (а), автокорреляционные функции (б) и спектр огибающей (с) в пиковых режимах генерации для случаев  $U_a = 12.8 \text{ kV}$  (левый столбец) и  $13.06 \text{ kV}$  (правый столбец).

трех мод с одинаковой амплитудой максимальное значение относительной интенсивности составляет величину  $I_{\max} = \max\{I(t)\} = 3$ , а для случая пяти мод увеличивается до 6.25. Превышение экспериментально наблюдаемых значений над теоретическими оценками объясняется большим количеством мод, вовлеченных в процесс синхронизации.

Третьим условием является близость минимального значения коэффициента корреляции между импульсами к единичному значению, что также выполнялось с хорошей точностью.

Наконец, четвертым условием является близость коэффициента заполнения  $D$  (отношение длительности импульсов к периоду их следования) к теоретическому пределу. Для случая синхронизации трех мод теоретическое значение  $D \approx 0.3$ , для случая пяти мод  $D \approx 0.2$ . В экспериментах для случая  $U_a = 12.8 \text{ kV}$  значение коэффициента заполнения составило  $D \approx 0.2$ , для случая  $U_a = 13.06 \text{ kV}$  —  $D \approx 0.15$ .

В совокупности это позволяет идентифицировать полученные режимы генерации как режимы самосинхронизации мод.

Отметим в заключение, что полученный генератор ультракоротких импульсов может быть использован в качестве источника входного сигнала для разрабатываемого в Институте прикладной физики гирорезонансного усилителя W-диапазона [16]. Согласно теоретическим оценкам, при этом можно рассчитывать на получение

ультракоротких импульсов с мощностью в сотни киловатт [17].

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] D.A. Robertson, D.R. Bolton, P.A.S. Cruickshank, R.I. Hunter, G.M. Smith, in *2006 European Radar Conf.* (IEEE, 2006), p. 150–153. DOI: 10.1109/EURAD.2006.280296
- [2] R.G. Griffin, T.M. Swager, R.J. Temkin, J. Magn. Res., **306**, 128 (2019). DOI: 10.1016/j.jmr.2019.07.019
- [3] B. Corzilius, Ann. Rev. Phys. Chem., **71**, 143 (2020). DOI: 10.1146/annurev-physchem-071119-040222
- [4] C.C. Cutler, Proc. IRE, **43** (2), 140 (1955). DOI: 10.1109/JRPROC.1955.278070
- [5] N.S. Ginzburg, S.V. Samsonov, G.G. Denisov, M.N. Vil'kov, 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
- [6] R.M. Rozental, A.A. Ivanov, D.A. Sidorov, M.N. Vil'kov, IEEE Trans. Electron Dev., **70**, 5940 (2023). DOI: 10.1109/TED.2023.3317368
- [7] R.M. Rozental, A.A. Ivanov, IEEE Trans. Electron Dev., **71** (8), 5142 (2024). DOI: 10.1109/TED.2024.3413727
- [8] X. Zhang, J. Feng, J. Cai, X. Wu, Y. Du, J. Chen, S. Li, W. Meng, IEEE Trans. Electron Dev., **64** (12), 5151 (2017). DOI: 10.1109/TED.2017.2766664

- [9] A.M. Cook, E.L. Wright, K.T. Nguyen, C.D. Joye, J.C. Rodgers, R.L. Jaynes, I.A. Chernyavskiy, F.N. Wood, B.S. Albright, D.K. Abe, J.P. Calame, IEEE Trans. Electron Dev., **68** (5), 2492 (2021). DOI: 10.1109/TED.2021.3068926
- [10] P. Pan, Y. Zheng, Y. Li, X. Song, Z. Feng, J. Feng, R.D. Britt, N.C. Luhmann, IEEE Trans. Electron Dev., **70** (11), 5897 (2023). DOI: 10.1109/TED.2023.3312230
- [11] P. Pan, L. Zhang, H. Cui, J. Feng, IEEE Electron Dev. Lett., **43** (5), 816 (2022). DOI: 10.1109/LED.2022.3164660
- [12] А.А. Иванов, Изв. вузов. Радиофизика, **59** (8-9), 721 (2016). [A.A. Ivanov, Radiophys. Quantum Electron., **59** (8-9), 648 (2017). DOI: 10.1007/s11141-017-9731-0].
- [13] А.А. Иванов, М.С. Нагорнюк, А.Е. Смирнов, М.Н. Вилков, Н.С. Гинзбург, Р.М. Розенталь, Изв. РАН. Сер. физ., **84** (2), 238 (2020). DOI: 10.31857/S0367676520020143 [A.A. Ivanov, M.S. Nagornuk, A.E. Smirnov, M.N. Vilkov, N.S. Ginzburg, R.M. Rozenal, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **84**, 184 (2020). DOI: 10.3103/S1062873820020136].
- [14] N.S. Ginzburg, M.I. Petelin, Int. J. Electron., **59** (3), 291 (1985). DOI: 10.1080/00207218508920701
- [15] Н.М. Рыскин, Изв. вузов. Радиофизика, **47** (2), 129 (2004). [N.M. Ryskin, Radiophys. Quantum Electron., **47** (2), 116 (2004). DOI: 10.1023/B:RAQE.0000035693.16782.94].
- [16] S.V. Samsonov, G.G. Denisov, I.G. Gachev, A.A. Bogdasho, IEEE Electron Dev. Lett., **41** (5), 773 (2020). DOI: 10.1109/LED.2020.2980572
- [17] N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, V.Yu. Zaslavsky, I.V. Zheleznov, S.V. Samsonov, S.V. Mishakin, Phys. Plasmas, **22** (11), 113111 (2015). DOI: 10.1063/1.4935905