



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.2>

УДК: 537.86, 621.373

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ РЕЖИМОВ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ МОД В ГИРОРЕЗОНАНСНОЙ ЛАМПЕ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ С ЦЕПЬЮ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

А.А. Богдашов, М.Н. Вилков, И.Г. Гачев, Н.С. Гинзбург,
И.В. Зотова, Р.М. Розенталь, С.В. Самсонов

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2025 г.

Аннотация. Экспериментально получен режим импульсно-периодической генерации в гирорезонансной лампе обратной волны (ЛОВ) с цепью обратной связи, обеспечивающей высокий (на уровне 0.9) коэффициент передачи. Эксперименты проводились на базе гиро-ЛОВ диапазона 30 ГГц с рабочим пространством в виде волновода с трехзаходной гофрировкой. Частота следования импульсов с длительностью ~ 1.5 нс составила около 220 МГц. Дана интерпретация наблюдаемого режима как эффекта синхронизации мод кольцевого резонатора, образованного пространством взаимодействия гиро-ЛОВ и цепью обратной связи.

Ключевые слова: гирорезонансная лампа обратной волны, импульсно-периодическая генерация, цепь обратной связи, синхронизация мод.

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта РНФ 23-12-00291.

Автор для переписки: Вилков Михаил Николаевич, vilkovmn@ipfran.ru

Введение

Генерация импульсно-периодического излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов на основе вакуумных приборов с электронными потоками представляет интерес для ряда приложений, включая диагностику плазмы, радиолокацию, ускорение заряженных частиц и др. К настоящему времени релятивистские лампы обратной волны (ЛОВ) с длительностью СВЧ импульса порядка сотен высокочастотных колебаний обеспечивают в указанных диапазонах суб-гигаваттный и гигаваттный уровень мощности [1-3], а при работе в режиме сверхизлучения (длительность импульса порядка десятков колебаний) достигается мультигигаватная пиковая мощность [4-5]. В то же время в наиболее интересных для приложений импульсно-периодических режимах частота повторения как правило не превышает 1-3 кГц, что ограничено возможностями высоковольтных источников питания. Кроме того, для ряда приложений требуется корреляция генерируемых импульсов по фазе, что не может быть обеспечено при их формировании независимыми импульсами тока.

В связи с вышеизложенным привлекают внимание исследования по импульсно-периодической пиковой генерации, возникающей на одном импульсе тока или при квазистационарной электронной инжекции за счет различных методов синхронизации мод электродинамической системы. В частности, недавно экспериментально продемонстрирована возможность пассивной синхронизации мод, которая реализуется при установке насыщающегося поглотителя в цепь обратной гирорезонансного усилителя [6]. Еще одним подходом является синхронизация мод за счет модуляции добротности рабочего резонатора ЛОВ [7] и гиротронов [8]. При использовании таких подходов возможно обеспечить частоту следования ультракоротких импульсов до нескольких сотен мегагерц при высокой степени фазовой корреляции.

В то же время с точки зрения простоты реализации импульсно-периодических режимов привлекательной выглядит схема самосинхронизации мод, реализующаяся в электронных генераторах с внешними отражениями либо с высокодобротной линией обратной связи. Впервые такая возможность

была теоретически показана в [9] для лазеров на свободных электронах с высокодобротным резонатором. В то же время в относительно длинноволновых диапазонах для реализации подобных режимов естественно использовать лампы обратной волны (ЛОВ). Теоретически возможность квазипериодической генерации в черенковских ЛОВ с отражениями была продемонстрирована в [10-13]. В эксперименте [14] с релятивистской ЛОВ диапазона 10 ГГц за счет введения отражений получена генерация периодической последовательности субнаносекундных СВЧ импульсов на протяжении электронного пучка длительностью около 40 нс. Пиковая мощность излучения достигала 1 ГВт, а частота повторения составляла 170 МГц.

С точки зрения повышения частоты генерируемых импульсов с переходом в миллиметровый и далее в субмиллиметровый диапазон привлекательным выглядит использование циклотронного механизма взаимодействия, то есть переход к гирорезонансным ЛОВ. Дополнительным преимуществом можно считать возможность квазистационарной пиковой генерации, поскольку гирорезонансные приборы как правило запитываются пучками от термоэмиссионных катодов, тогда как в релятивистских ЛОВ используется короткоимпульсная взрывная эмиссия. В настоящей работе впервые экспериментально продемонстрировано, что эффект самосинхронизации мод может быть реализован и в гирорезонансной лампе обратной волны с винтовой гофрировкой рабочего волновода (далее, винтовая гиро-ЛОВ) при создании цепи обратной связи с большим коэффициентом передачи.

Результаты экспериментов

Экспериментальные исследования проводились на высоковольтном стенде винтовой гиро-ЛОВ диапазона 30 ГГц, оснащенной электронно-оптической системой формирования вращающегося приосевого электронного пучка на основе реверса магнитного поля [15]. Пространство электронно-волнового взаимодействия генератора представляло себя волновод с трехзаходной винтовой гофрировкой, обеспечивающей взаимную связь низшей волны

электродинамической системы TE_{11} с волной противоположного вращения TE_{-21} . Взаимодействие с электронным потоком при этом происходило на второй гармонике гирочастоты. Основные параметры электронного потока и электродинамической системы представлены в Табл.1.

Таблица 1. Основные параметры электронного потока и электродинамической системы/

Энергия электронов	40 кэВ
Ток пучка	6 А
Средний радиус волновода	3.6 мм
Период гофрировки	11.6 мм
Длина волновода	240 мм

Стенд обеспечивал возможность работы с частотой повторения импульсов тока до 10 Гц при длительности единичного импульса около 120 мкс. Основное постоянное магнитное поле величиной ~ 0.65 Тл формировалось соленоидом с жидкостным охлаждением. Дополнительная катушка, установленная в области катода, обеспечивала возможность подстройки начального значения питч-фактора электронов g (отношения поперечной и продольной скоростей) в интервале от 0.3 до 1.9. Цепь обратной связи создавалась с помощью квазиоптической линии передачи, использованной ранее в работе [6], и обеспечивала возможность плавной регулировки глубины обратной связи в интервале от 0 до 0.9. Диагностика выходного излучения осуществлялась полупроводниковым детектором с временем нарастания не хуже 0.3 нс. Сигнал с детектора регистрировался цифровым осциллографом с полосой 1 ГГц и частотой дискретизации 5 Гвыб/с.

Напомним, что эффект синхронизации мод проявляется при сложении сфазированных колебаний с эквидистантным спектром [16]. В простейшем случае взаимодействия трех колебаний $a_k(t) = a_0 \exp(i[(\omega + k\Delta\omega)t + \varphi_k])$, $k = -1, 0, 1$, при условии сфазированности мод $\varphi_k = \varphi$, суммарная амплитуда запишется в виде:

$$A(t) = \sum_k a_k(t) = a_0 e^{i(\omega t + \varphi)} (2 \cos(\Delta\omega t) + 1), \quad (1)$$

а суммарная интенсивность представляется как:

$$I(t) = \operatorname{Re}\{A(t)\}^2 = a_0^2 (2\cos(\Delta\omega t) + 1)^2 \cos^2(\omega t). \quad (2)$$

Согласно (2), в суммарном сигнале образуются равномерно отстоящие друг от друга волновые пакеты с пиковой интенсивностью:

$$I_{\max} = 9a_0^2 = 6\langle I(t) \rangle, \quad (3)$$

где $\langle I(t) \rangle = 1.5a_0^2$ – среднее значение интенсивности, вычисленное по всей реализации. В случае, если $A(t)$ является огибающей детектированного сигнала, отношение максимального значения нормированной интенсивности к среднему значению по сравнению с выражением (3) уменьшается в два раза.

При нарушении условия сфазированности мод происходит уменьшение пиковой интенсивности волновых пакетов. К примеру, для случая $\varphi_{-1} = \varphi_{+1} = 0$, $\varphi_0 \neq 0$ выражение (3) запишется в виде:

$$I_{\max} = (5 + |4\cos\varphi_0|)a_0^2. \quad (4)$$

Очевидно, что самым неблагоприятным является случай $\varphi_0 = \pi/2 + \pi n$, где n – целое число, при котором $\cos(\varphi_0) = 0$ и $\max\{I\} \approx 0.55I_{\max}$. На рис. 1 в левом столбце представлена зависимость относительной интенсивности $I/\langle I \rangle$ в случае сложения трех эквидистантных мод с параметрами $\omega = 4\pi$, $\Delta\omega = \omega/10$ при значениях $\varphi_0 = \pi/2$, $\varphi_0 = 3\pi/8$ и $\varphi_0 = 0$. Видно, что при изменении фазы колебания происходит переход от режима периодического изменения интенсивности (рис. 1а) к режиму пиковой генерации (рис. 1в), в котором все три колебания сфазированы.

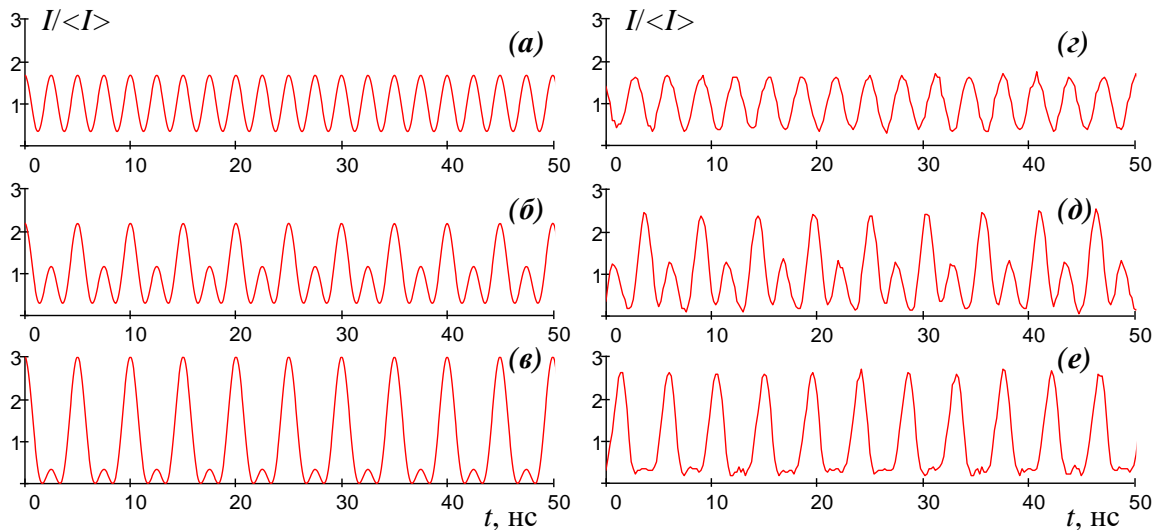


Рис. 1. Левый столбец – зависимости от временной переменной относительной интенсивности сигнала при сложении трех эквидистантных колебаний для случаев: (а) $\varphi_0 = \pi/2$, (б) $\varphi_0 = 3\pi/8$ и (в) $\varphi_0 = 0$ ($\varphi_{-1} = \varphi_{+1} = 0$).

Правый столбец – осциллограммы, наблюдаемые в эксперименте для разных значений питч-фактора: (г) $g = 0.63$, (д) $g = 0.71$ и (е) $g = 0.74$.

Аналогичные временные зависимости были зарегистрированы в эксперименте при больших значениях глубины обратной связи, соответствующей коэффициенту передачи порядка 0.9. При увеличении питч-фактора электронов от 0.63 до 0.74 наблюдался переход от режима периодического изменения интенсивности сигнала (рис. 1г) к режиму пиковой генерации (рис. 1е). Частота следования импульсов составила около 220 МГц при длительности импульсов по полувисоте порядка 1.5 нс. Увеличение питч-фактора свыше 0.74 приводило к хаотизации колебаний. При уменьшении глубины обратной связи пиковые режимы не регистрировались.

Сравнение наблюдаемых периодических режимов генерации (рис. 1, правый столбец) с зависимостями, полученными аналитически (рис. 1, левый столбец), позволяет сделать вывод о синхронизации нескольких мод при значении питч-фактора 0.74. Фактически эти моды являются собственными модами кольцевого резонатора, образованного электродинамической системой гирорезонансной ЛОВ и цепью обратной связи. Эксперимент демонстрирует, что механизм возникновения пиковых режимов генерации является универсальным для ламп обратной волны независимо от типа используемого индуцированного излучения.

Заключение

Таким образом, сравнение наблюдаемых периодических режимов генерации (рис. 1, правый столбец) с зависимостями, полученными аналитически (рис 1, левый столбец), позволяет сделать вывод о синхронизации нескольких мод при значении питч-фактора 0.74. Фактически эти моды являются собственными модами кольцевого резонатора, образованного электродинамической системой гирорезонансной ЛОВ и цепью обратной связи. В целом эксперимент демонстрирует, что механизм возникновения пиковых режимов генерации является универсальным для ламп обратной волны независимо от типа используемого индуцированного излучения. В то же время использование giro-ЛОВ позволяет существенно повысить частоту выходного излучения по сравнению с релятивистскими ЛОВ черенковского типа [13-14], а также перейти к непрерывным режимам генерации.

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта РНФ 23-12-00291.

Литература

1. Кладухин В. В., Храмцов С. П., Ялов В. Ю. Релятивистская лампа обратной волны с продольно-щелевым дифракционным выходом // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48. – №. 3. – С. 28-31. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.03.51979.19039>
2. Xiaoze L. et al. Experimental study of a Ku-band RBWO packaged with permanent magnet // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Т. 66. – №. 10. – С. 4408-4412. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2936835>
3. Xiao R. et al. Efficient generation of multi-gigawatt power by an X-band dual-mode relativistic backward wave oscillator operating at low magnetic field // Physics of Plasmas. – 2020. – Т. 27. – №. 4. <https://doi.org/10.1063/5.0002361>
4. Rostov V. V. et al. Superradiant Ka-band Cherenkov oscillator with 2-GW peak power // Physics of Plasmas. – 2016. – Т. 23. – №. 9., <https://doi.org/10.1063/1.4962189>

5. Ginzburg N. S. et al. Generation of electromagnetic fields of extremely high intensity by coherent summation of Cherenkov superradiance pulses // Physical review letters. – 2015. – Т. 115. – №. 11. – С. 114802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.114802>
6. Ginzburg N. S. et al. Ka-band 100-kW subnanosecond pulse generator mode-locked by a nonlinear cyclotron resonance absorber // Physical Review Applied. – 2021. – Т. 16. – №. 5. – С. 054045. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.054045>
7. Denisov G. G., Kuzikov S. V., Savilov A. V. Q-switching in the electron backward-wave oscillator // Physics of plasmas. – 2011. – Т. 18. – №. 10. <https://doi.org/10.1063/1.3644472>
8. Alberti S. et al. Nanosecond Pulses in a THz Gyrotron Oscillator Operating in a Mode-Locked Self-Consistent Q-Switch Regime // Physical review letters. – 2013. – Т. 111. – №. 20. – С. 205101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.205101>
9. Bogomolov Y. L. et al. Nonstationary generation in free electron lasers // Optics Communications. – 1981. – Т. 36. – №. 3. – С. 209-212. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(81\)90359-X](https://doi.org/10.1016/0030-4018(81)90359-X)
10. Levush B. et al. Theory of relativistic backward-wave oscillators with end reflectors // IEEE transactions on plasma science. – 2002. – Т. 20. – №. 3. – С. 263-280. <https://doi.org/10.1109/27.142828>
11. Ryskin N. M., Titov V. N. Self-modulation and chaotic regimes of generation in a relativistic backward-wave oscillator with end reflections // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2001. – Т. 44. – №. 10. – С. 793-806. <https://doi.org/10.1023/A:1013717032173>
12. Розенталь Р. М., Гинзбург Н. С., Сергеев А. С. Перестройка периода автомодуляции в релятивистской ЛОВ с сильными отражениями // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2007. – Т. 50. – №. 12. – С. 1043-1047

13. 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 Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – №. 1. – С. 51-54.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.01.50460.18527>
14. Тотьменинов Е. М. и др. Экспериментальная реализация способа генерации последовательности ультракоротких гигаваттных импульсов черенковского сверхизлучения с наносекундным периодом следования // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 115. – №. 8. – С. 479-483. <https://doi.org/10.31857/S1234567822080031>
15. Розенталь Р. М. и др. Перестраиваемый источник многочастотного излучения Ка-диапазона на основе импульсной гирорезонансной лампы обратной волны // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – №. 19. – С. 26-29.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.19.51509.18868>
16. Звелто О. Принципы лазеров. – Лань, 2008.

Для цитирования:

Богдашов А.А., Вилков М.Н., Гачев И.Г., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Самсонов С.В. Экспериментальное наблюдение режимов самосинхронизации мод в гирорезонансной лампе обратной волны с цепью обратной связи. // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.2>