

13.4

Перестраиваемый источник многочастотного излучения Ка-диапазона на основе импульсной гирорезонансной лампы обратной волны

© Р.М. Розенталь, С.В. Самсонов, А.А. Богдашов, И.Г. Гачев, А.Н. Леонтьев, Н.С. Гинзбург

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
E-mail: rrz@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 13 мая 2021 г.

В окончательной редакции 21 июня 2021 г.

Принято к публикации 23 июня 2021 г.

Получены режимы многочастотной генерации в импульсной гирорезонансной лампе обратной волны Ка-диапазона на основе волновода с винтовой гофрировкой. Импульсная мощность излучения составляла 30–35 kW при длительности импульсов около 120 μ s и частоте повторения до 10 Hz. За счет изменения величины магнитостатического поля в области взаимодействия и питч-фактора частиц реализована перестройка центральной частоты генерации в диапазоне 32–35.5 GHz и расстояния между основными спектральными линиями в диапазоне 360–550 MHz.

Ключевые слова: гиро-ЛОВ, винтовой гофрированный волновод, многочастотные режимы генерации.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51509.18868

Одним из применений мощного СВЧ-излучения миллиметрового диапазона является нагрев плазмы в электронно-циклотронных резонансных источниках ионов [1]. Одновременно значительный интерес вызывает применение в таких установках двухчастотного СВЧ-нагрева с целью подавления возникающих в плазме неустойчивостей [2–5]. В работе [6] было экспериментально продемонстрировано, что подобное излучение может быть получено в гирорезонансной лампе обратной волны (гиро-ЛОВ) со спирально-гофрированным волноводом (далее винтовая гиро-ЛОВ) при введении сильных внешних отражений. При этом реализуется так называемый „частотный“ механизм автомодуляции, связанный с одновременным возбуждением нескольких продольных мод совокупной электродинамической системы. Определенным недостатком такого подхода является дискретный характер перестройки расстояния между спектральными компонентами. Как показано далее, непрерывную перестройку соответствующего расстояния в винтовой гиро-ЛОВ можно реализовать и без использования внешних отражений.

Экспериментальные исследования проводились на основе импульсной винтовой гиро-ЛОВ Ка-диапазона. Электронная пушка с реверсом магнитного поля, аналогичная использованной в работе [7], формировала винтовую электронную пучок с энергией 40 keV, током 6 A, питч-фактором (отношением поперечной осцилляторной скорости к продольной) до 1.8, разбросом поперечных скоростей 15–25% при длительности импульса около 120 μ s (рис. 1, а). Высоковольтный модулятор обеспечивал частоту повторения импульсов до 10 Hz. Основное магнитное поле величиной 0.5–0.7 T в области взаимодействия формировалось „теплым“ соленоидом на постоянном токе с жидкостным охлаждением. При этом

за счет подстройки тока I_k дополнительной катушки со встречным направлением поля, расположенной в области катода (катодной катушки), можно было обеспечивать плавное изменение коэффициента перемагничивания и соответственно питч-фактора электронов от 0.3 до 1.8 (согласно расчетам) при заданном значении тока основного соленоида I_{sol} .

Волновод с трехзаходной винтовой гофрировкой со средним радиусом 3.6 mm, периодом гофрировки 11.6 mm и длиной $L = 240$ mm обеспечивал связь встречной волны $TE_{1,1}$ и квазикритической моды $TE_{-2,1}$ и их взаимодействие с электронным пучком на второй гармонике циклотронной частоты. Расчетная групповая скорость рабочей волны в диапазоне частот 30–38 GHz составляла 0.5c. Трехдисковое вакуумное окно обеспечивало отражения менее 1% во всем диапазоне рабочих частот. Выходное излучение преобразовывалось в квазиоптический волновой пучок, порядка 1% мощности которого отклонялось диэлектрической пластиной в сторону находящегося на некотором расстоянии приемного рупора, соединенного со стандартным (сечением 7.2×3.4 mm) волноводом, так что для СВЧ-диагностики использовался сигнал милливаттного уровня мощности. Основная часть излучения поступала в калориметрическую нагрузку с внутренним калибратором, обеспечивавшую относительную точность измерения около 10% при уровне средней мощности выше 10 W. Диагностический сигнал поступал на полупроводниковый детектор с временем нарастания < 0.5 ns и регистрировался цифровым осциллографом с полосой 4 GHz (рис. 1, а). Спектральные измерения проводились методом гетеродинамирования путем подачи на осциллограф сигнала на разностной частоте, формируемой смещением сигнала опорного генератора Г4-156 с диаг-

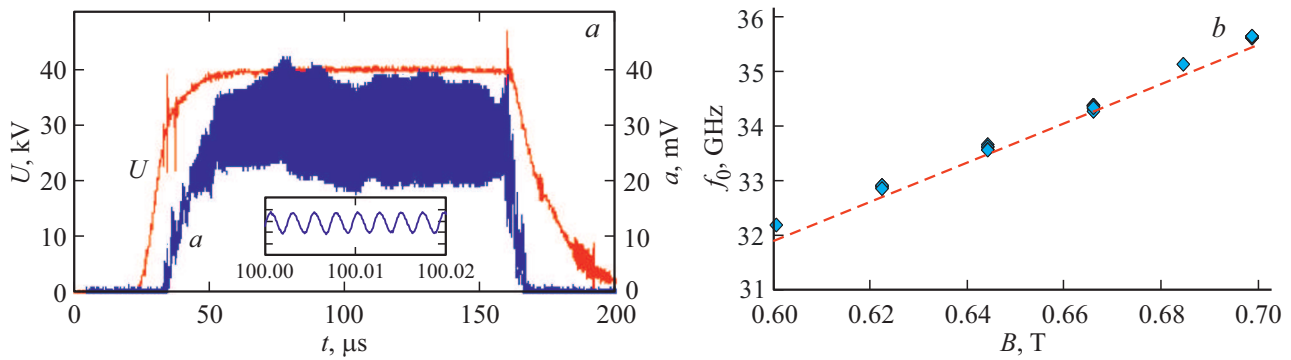


Рис. 1. *a* — осциллограммы импульса ускоряющего напряжения U и сигнала с детектора a в режиме периодической автомодуляции ($B \approx 0.7$ Т); *b* — зависимость центральной частоты генерации от магнитного поля (штриховая линия — расчетная частота точного синхронизма).

ностическим сигналом. Рабочая полоса смесителя составляла 12 GHz, частота дискретизации осциллографа составляла $2 \cdot 10^{10}$ выборок в секунду. При изменении магнитного поля осуществлялась подстройка частоты опорного генератора в диапазоне 31–33 GHz.

В экспериментах были зарегистрированы устойчивые режимы многочастотной генерации при изменении ведущего магнитного поля от 0.6 до 0.7 Т. Верхнее значение магнитного поля ограничивалось предельным током источника. В свою очередь при приближении к нижней границе мощность генерации значительно уменьшалась, что не позволяло проводить достаточно точные калориметрические измерения. Центральная частота генерации f_0 с хорошей точностью соответствовала расчетной частоте точного синхронизма (рис. 1, *b*).

На рис. 2 представлены характерные спектры выходного излучения при различных значениях магнитного поля B . В большинстве случаев спектр излучения состоял из двух спектральных линий, при этом частота сателлита была выше центральной частоты генерации. Максимальный уровень второй по интенсивности спектральной компоненты достигал -6 dB. При этом усредненная мощность излучения на вершине импульсов составляла от 20 до 35 kW.

При увеличении питч-фактора электронного пучка, осуществляемого за счет увеличения отношения тока катодной катушки I_k к току основного соленоида I_{sol} , наблюдался последовательный запуск стационарных одночастотных колебаний, последующий переход к режиму периодической и далее к режиму хаотической автомодуляции (рис. 3). Было зарегистрировано как минимум одно удвоение периода автомодуляции, последовательность которых является одним из типичных путей перехода к хаосу [8]. Заметим, что аналогичные бифуркации наблюдались ранее и в экспериментах с гиро-ЛОВ на основе гладкого волновода [9].

Одним из наиболее интересных и представляющих практический интерес результатов данных экспериментов, по нашему мнению, является демонстрация возможностей контролируемой перестройки частоты автомоду-

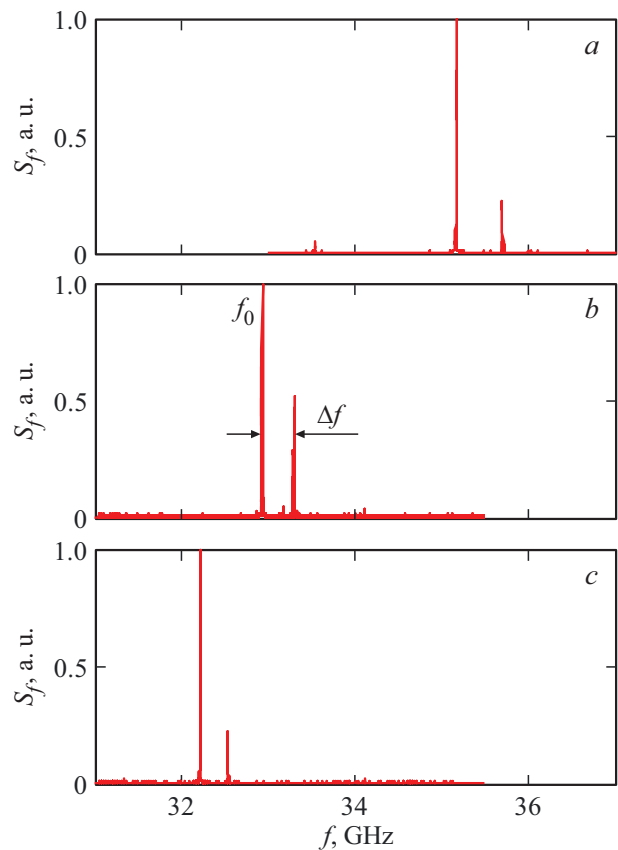


Рис. 2. Спектры выходного излучения при значениях ведущего магнитного поля $B \approx 0.68$ (*a*), 0.62 (*b*) и 0.6 Т (*c*).

ляции. Как показали эксперименты, при фиксированном значении тока основного соленоида изменение тока катодной катушки (приводящее, как было отмечено, к изменению питч-фактора частиц) позволяло менять частоту автомодуляции Δf в достаточно широких пределах, а именно 360–550 MHz (рис. 3). Отметим, что результаты трехмерного моделирования данной гиро-ЛОВ методом крупных частиц на основе программного пакета

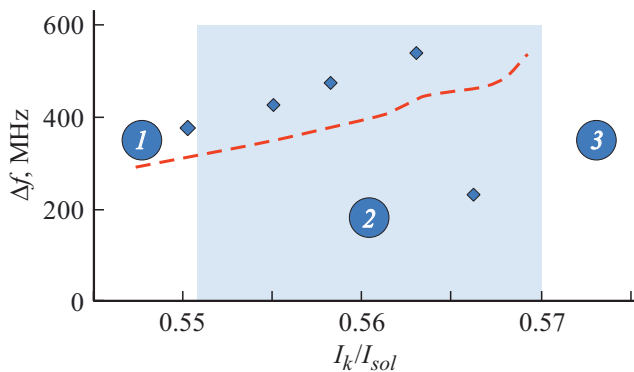


Рис. 3. Зависимость частоты автомодуляции Δf от отношения тока катодной катушки к току соленоида при $B \approx 0.68$ Т (штриховая линия — расчет, точки — экспериментальные данные). Цифрами обозначены области стационарной генерации (1), периодической автомодуляции (2), удвоения периода и перехода к хаотической автомодуляции (3). Согласно расчетам, при увеличении I_k/I_{sol} от 0.55 до 0.566 питч-фактор частиц меняется от 1 до 1.8.

CST Studio Suite качественно соответствуют результатам эксперимента: при повышении питч-фактора электронов режим взаимодействия меняется от стационарной одночастотной генерации до автомодуляции со спектром с двумя выраженными частотами, разность между которыми меняется от 300 до 530 МГц (рис. 3, штриховая линия).

В общих чертах динамика исследуемого прибора соответствует свойствам распределенных систем, в которых электронный поток взаимодействует со встречной волной [10], например ЛОВ черенковского типа, однако обнаруженную зависимость частоты автомодуляции от питч-фактора сложно объяснить на основе простейших оценок. Известно, что частота автомодуляции в ЛОВ определяется временем замыкания цепи обратной связи $T = L/|v_{gr}| + L/v_{\parallel}$, где v_{gr} , v_{\parallel} — групповая скорость рабочей волны и поступательная скорость электронов. При этом, как показывают расчеты, частота автомодуляции в черенковской ЛОВ примерно в 1.5 раза меньше величины T^{-1} [11–13]. В нашем случае $v_{gr} \approx 0.5c$, $v_{\parallel} \approx (0.2–0.25)c$, что дает значение $T^{-1} \approx 180–220$ МГц. Таким образом, наблюдаемая частота автомодуляции в винтовой гиро-ЛОВ более чем вдвое превышает обратное время замыкания цепи обратной связи $\Delta f \geq 2T^{-1}$. Кроме того, по мере увеличения питч-фактора электронов наблюдается увеличение частоты автомодуляции, хотя, согласно приведенной формуле, увеличение питч-фактора, сопровождающееся уменьшением поступательной скорости электронов, должно приводить к увеличению T и соответственно уменьшению частоты автомодуляции. Таким образом, некоторые особенности генерации в винтовой гиро-ЛОВ существенно отличаются от хорошо изученных эффектов, сопровождающих автомодуляцию в черенковских ЛОВ.

В связи с этим следует обратить внимание на результаты работ [14–16], где возникновение автомодуляции в гиро-ЛОВ на основе гладкого волновода связывается с возбуждением более высоких продольных мод системы. При этом, например, расчетная разность между частотами основной и первой продольной мод составляет величину около 500 МГц для гиро-ЛОВ Ка-диапазона [14], что весьма близко к измеренным в эксперименте величинам Δf . Это предположение подтверждается также и спектрами излучения, большинство из которых состояло из двух основных спектральных линий (рис. 2).

Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований и „прямого“ трехмерного моделирования не только представляются важными с практической точки зрения, но и стимулируют дальнейшую разработку нестационарной теории и упрощенной модели винтовой гиро-ЛОВ, которая может быть построена на основе уже имеющихся численных моделей винтовой гиротронной лампы бегущей волны [17].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00955), а также частично в рамках госзадания (номер темы 0030-2019-0001).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Скалыга, С.В. Голубев, И.В. Изотов, Р.Л. Лапин, С.В. Разин, А.В. Сидоров, Р.А. Шапошников, Прикладная физика, № 1, 17 (2019).
- [2] A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, I.V. Izotov, Plasma Phys. Control. Fusion, **62** (6), 065005 (2020). DOI: 10.1088/1361-6587/ab7f98
- [3] V. Toivanen, G. Bellodi, D. Küchler, F. Wenander, O. Tarvainen, Phys. Rev. Accel. Beams, **20** (10), 103402 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.103402
- [4] R. Rácz, S. Biri, Z. Perduk, J. Pálinkás, D. Mascali, M. Mazzaglia, E. Naselli, G. Torrissi, G. Castro, L. Celona, S. Gammino, A. Galata, JINST, **13** (12), C12012 (2018). DOI: 10.1088/1748-0221/13/12/C12012
- [5] E. Naselli, D. Mascali, M. Mazzaglia, S. Biri, R. Rácz, J. Pálinkás, Z. Perduk, A. Galatá, G. Castro, L. Celona, S. Gammino, G. Torrissi, Plasma Sources Sci. Technol., **28** (8), 085021 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab32f9
- [6] Р.М. Розенталь, С.В. Самсонов, А.А. Богдашов, И.Г. Гачев, М.Ю. Глявин, Письма в ЖТФ, **47** (6), 11 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.06.50750.18510
- [7] S.V. Samsonov, I.G. Gachev, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, S.V. Mishakin, A.S. Fiks, E.A. Soluyanov, E.M. Tai, Y.V. Dominyuk, V.A. Levitan, V.N. Murzin, IEEE Trans. Electron Dev., **61** (12), 4264 (2014). DOI: 10.1109/TED.2014.2364623
- [8] M.J. Feigenbaum, Physica D, **7** (1-3), 16 (1983). DOI: 10.1016/0167-2789(83)90112-4

- [9] R.M. Rozentel, N.S. Ginzburg, M.Y. Glyavin, A.S. Sergeev, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **54** (6), 2741 (2006). DOI: 10.1109/TMTT.2006.874876
- [10] Д.И. Трубецков, А.П. Четвериков, Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика, **2** (5), 9 (1994).
- [11] Н.С. Гинзбург, С.П. Кузнецов, Т.Н. Федосеева, Изв. вузов. Радиофизика, **21** (7), 1037 (1978).
- [12] Н.М. Рыскин, В.Н. Титов, Изв. вузов. Радиофизика, **44** (10), 860 (2001).
- [13] С.П. Кузнецов, Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика, **14** (5), 3 (2006).
- [14] S.H. Chen, K.R. Chu, T.H. Chang, Phys. Rev. Lett., **85** (12), 2633 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.2633
- [15] S.H. Chen, T.H. Chang, K.F. Pao, C.T. Fan, K.R. Chu, Phys. Rev. Lett., **89** (26), 268303 (2002). DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.268303
- [16] A. Grudiev, K. Schünemann, IEEE Trans. Plasma Sci., **30** (3), 851 (2002). DOI: 10.1109/TPS.2002.801610
- [17] Н.С. Гинзбург, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев, И.В. Зотова, Письма в ЖТФ, **43** (3), 50 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.03.44227.16313