

13.4

Многочастотное излучение киловаттного уровня мощности в непрерывной винтовой гирорезонансной лампе обратной волны К-диапазона с внешними отражениями

© Р.М. Розенталь, С.В. Самсонов, А.А. Богдашов, И.Г. Гачев, М.Ю. Глявин

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

Поступило в Редакцию 14 августа 2020 г.

В окончательной редакции 30 ноября 2020 г.

Принято к публикации 30 ноября 2020 г.

За счет введения внешних отражений в гирорезонансной лампе обратной волны на основе винтового гофрированного волновода экспериментально реализованы режимы одновременного возбуждения нескольких продольных мод совокупной электродинамической системы. Получено излучение диапазона 24 GHz со средней мощностью 0.9–1.2 kW с характерным расстоянием между спектральными компонентами 96–120, 232–280 и 464–640 MHz, соответствующими возбуждению продольных мод с различными индексами.

Ключевые слова: гиро-ЛОВ, автомодуляционные режимы, многочастотный нагрев плазмы.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.06.50750.18510

В настоящее время активно исследуются процессы двухчастотного СВЧ-нагрева плазмы, которые требуют непрерывного излучения с уровнем мощности как минимум в сотни ватт [1–4]. В сантиметровом диапазоне для этого используются приборы с прямолинейными электронными потоками, такие как клистроны и лампы бегущей волны (ЛОВ). Однако необходимость транспортировки электронных пучков на расстояния порядка длины волны от границ электродинамической системы в значительной степени сдерживает продвижение приборов данного класса в область более высоких частот, где подобные исследования могли бы быть проведены с плазмой большей плотности. В связи с этим большой интерес представляют приборы гирорезонансного типа, где винтовой электронный поток может взаимодействовать с модами, поля которых сосредоточены вдали от поверхности электродинамической системы [5]. В настоящее время на основе источников такого типа реализованы технологические комплексы, рассчитанные на непрерывную работу и обеспечивающие выходную мощность 20 kW на частоте 45 GHz и более 2.5 kW на частоте 300 GHz [6]. Это как минимум на порядок превышает значения, достигнутые в классических СВЧ-приборах с прямолинейными электронными потоками.

Вместе с тем ввиду довольно значительной энергетики электронных потоков и необходимости создания сильных магнитных полей гирорезонансные приборы являются достаточно громоздкими и дорогостоящими устройствами, что ограничивает возможности одновременного использования нескольких таких источников. Одним из решений является применение многочастотных автомодуляционных режимов генерации, возникающих при значительных уровнях надкритичности (превышения рабочего тока над стартовыми значениями) [7–10]. При этом введение отражений выходного

излучения позволяет значительно снизить бифуркационные значения токов, что делает возможным получение многочастотных режимов генерации без существенных изменений энергетических параметров электронного потока [11–14]. В случае сильных отражений спектральные линии излучения в режиме периодической автомодуляции близки к резонансным частотам совокупной электродинамической системы, образованной электродинамической системой и внешним отражателем. Это достаточно универсальное свойство СВЧ-генераторов характерно, в частности, и для генераторов на основе ЛОВ с внешним отражателем [15–17].

В связи с этим представляет интерес исследование возможностей получения многочастотного излучения, пригодного для задач нагрева плазмы, на основе гирорезонансных ЛОВ (гиро-ЛОВ) с винтовым гофрированным волноводом. Такие генераторы привлекательны в первую очередь в связи с возможностью плавной и широкополосной перестройки частоты излучения в пределах одной поперечной моды электродинамической системы при изменении циклотронной частоты. При этом по сравнению с генераторами на основе гладких волноводов при тех же параметрах электронного пучка винтовой волновод позволяет в 2–3 раза расширить полосу перестройки частоты.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальной реализации многочастотных режимов генерации в ЛОВ такого типа и определении основных характеристик полученного излучения. Исследования проводились с использованием непрерывной винтовой гиро-ЛОВ с центральной рабочей частотой около 24 GHz [18]. Схема основных компонентов системы представлена на рис. 1. Электронная пушка магнетронно-инжекторного типа (1, 2 на рис. 1) формировала винтовой электронный пучок с радиусом ведущих центров 1.7 mm, энергией

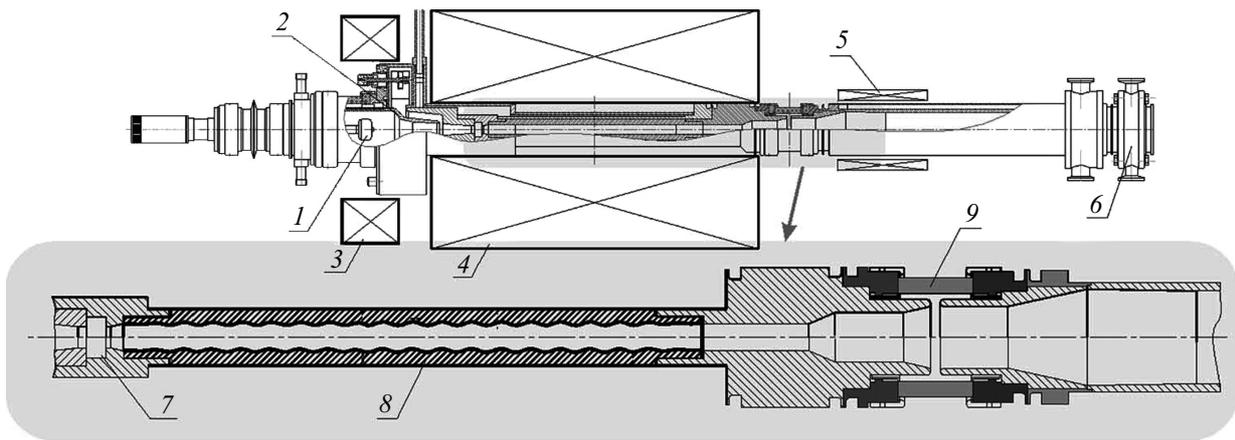


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 — катод, 2 — анод, 3 — катодная катушка, 4 — соленоид ведущего магнитного поля, 5 — коллекторная катушка, 6 — выходное рассогласованное окно с системой охлаждения, 7 — резонансный отражатель, 8 — винтовой гофрированный волновод, 9 — коллекторный изолятор.

до 20 keV, током до 2 А и расчетным питч-фактором (отношением поперечной осцилляторной скорости к продольной) 1.2–1.5 при разбросе поперечных скоростей 10–15%. Ведущее магнитное поле величиной до 0.5 Т формировалось „теплым“ соленоидом 4 на постоянном токе с жидкостным охлаждением. Рабочее магнитное поле менялось в пределах 0.4–0.5 Т, при этом сохранение заданной величины питч-фактора частиц обеспечивалось соответствующей подстройкой тока дополнительной катодной катушки 3. Для осаждения пучка на коллектор использовалась коллекторная катушка 5, создающая встречное по отношению к основному магнитное поле.

Волновод 8 с трехзаходной винтовой гофрировкой со средним радиусом 5.65 mm, периодом гофрировки 11.7 mm и длиной 180 mm обеспечивал связь бегущей моды $TE_{1,1}$ и квазикритической моды $TE_{2,1}$ обратного вращения и их взаимодействие с электронным пучком на второй гармонике циклотронной частоты. При этом групповая скорость рабочей волны составляла $(0.2–0.25)c$. Для отражения возбуждаемой волны от катодного конца пространства взаимодействия использовался резонансный отражатель 7, выполненный в виде канавки прямоугольного профиля, представляющей собой закрытый резонатор для моды $TM_{1,1}$. За счет дифракционной связи с запертой модой $TM_{1,1}$ падающая на такую канавку рабочая волна $TE_{1,1}$ эффективно отражается на частотах, близких к соответствующей резонансной частоте. При этом в том случае, когда критическая частота, соответствующая минимальному радиусу канавки, ниже частоты падающей волны на 30–40%, полоса отражения может быть довольно значительной. Так, указанный отражатель обеспечивал коэффициент отражения по мощности более 95% в полосе частот от 22 до 26 GHz.

Коллекторный изолятор 9 был рассчитан на работу при статическом напряжении до 10 kV и обеспечивал возможность реализации режимов с рекуперацией

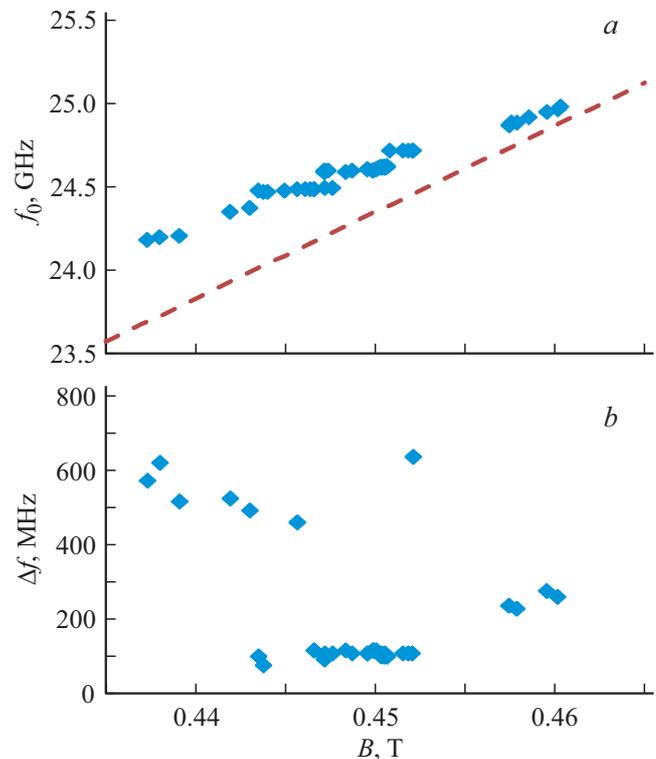


Рис. 2. Экспериментальные зависимости от магнитного поля: *a* — центральной частоты генерации f_0 (штриховая линия — расчетная частота точного синхронизма gyro-LWB); *b* — расстояния между соседними линиями спектра Δf .

энергии электронного потока (в данных экспериментах указанная возможность не использовалась). Для снижения потерь мощности выходного излучения использовалась система цилиндрических и конических участков, на которых рабочая волна $TE_{1,1}$ преобразовывалась в набор мод, суммарное поле которых в области волнового разрыва было сосредоточено далеко от стенок.

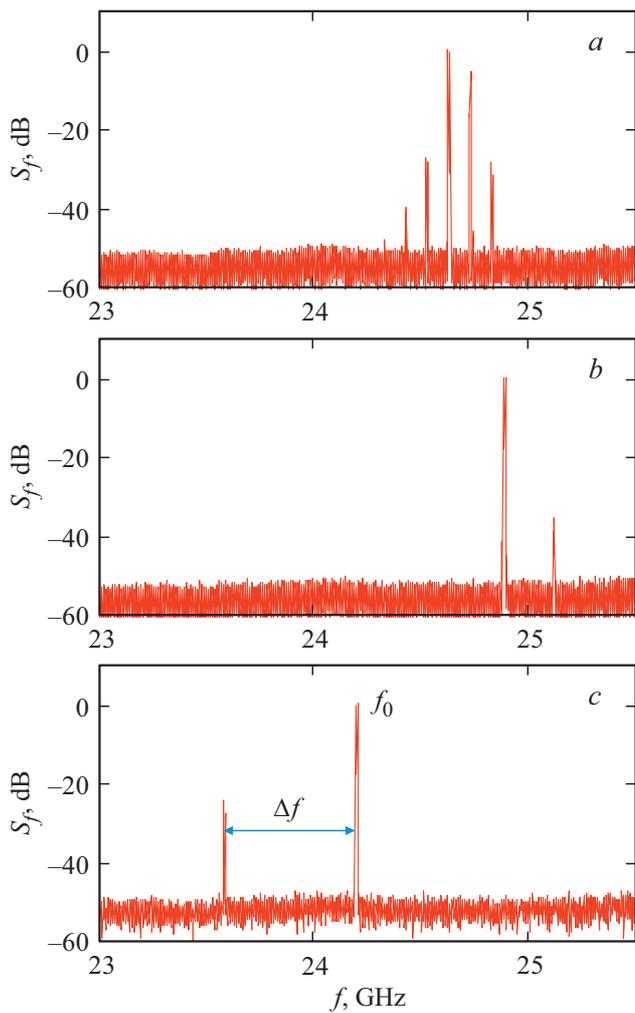


Рис. 3. *a* — спектр излучения при возбуждении соседних мод с числом продольных вариаций n и $n + 1$ ($B = 0.4506$ Т); *b* — мод с числом продольных вариаций n и $n + 2$ ($B = 0.4578$ Т); *c* — n и $n + 6$ ($B = 0.438$ Т).

В свою очередь на выходе данного участка этот набор мод преобразовывался обратно в поле волны $TE_{1,1}$. В соответствии с расчетами коэффициент передачи данной системы в диапазоне 23–25 GHz составлял не менее 95%. Выходное окно *b*, аналогичное типичным окнам технологических гиротронов, было изготовлено из нитрида бора (BN) [19]. Рассогласование окна было реализовано за счет уменьшения его толщины, так что в рабочем диапазоне частот коэффициент отражений составил порядка 30% от мощности падающего излучения.

Регистрация спектра излучения gyro-JOB проводилась с помощью спектроанализатора Keysight N9010A с верхней границей диапазона частот 44 GHz. Выходная мощность определялась при помощи калориметрического измерителя, являвшегося одновременно согласованной нагрузкой и обеспечивавшего относительную точность измерения около 10% при уровне мощности выше 1 kW. Центральная частота генерации была близка

к расчетной частоте точного синхронизма (рис. 2, *a*). Режимы периодической автомодуляции наблюдались в диапазоне изменения ведущего магнитного поля от 0.437 до 0.460 Т (рис. 2, *b*). При этом в середине полосы по магнитному полю частота автомодуляции была сосредоточена в интервале значений $\Delta f = 96$ –120 MHz, близких к обратному времени прохода излучения по цепи обратной связи $1/T \approx 110$ MHz. При увеличении магнитного поля наблюдались режимы с $\Delta f = 232$ –280 MHz, а при уменьшении — с $\Delta f = 464$ –640 MHz. Примеры спектров выходного излучения с частотами автомодуляции 104, 232 и 624 MHz и средней мощностью 1.2, 1.6 и 0.9 kW соответственно представлены на рис. 3.

Наблюдаемая динамика системы соответствует так называемому частотному механизму возникновения автомодуляции, связанному с одновременным возбуждением нескольких продольных мод резонатора, образованного отражателем *7* и рассогласованным окном *6*. При этом случай $\Delta f = 96$ –120 MHz соответствует возбуждению соседних мод с числом продольных вариаций n и $n + 1$, $\Delta f = 232$ –280 MHz — мод с числом продольных вариаций n и $n + 2$, $n + 3$, $\Delta f = 464$ –640 MHz — n и $n + 5$, $n + 6$.

С практической точки зрения наиболее интересным представляется режим возбуждения соседних продольных мод с соразмерной интенсивностью спектральных компонент и средней мощностью, превышающей 1 kW (рис. 3, *a*). Такое излучение может найти применение в системах многочастотного нагрева плазмы с близкими значениями частот [2].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00955).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Skalyga, I. Izotov, T. Kalvas, H. Koivisto, J. Komppula, R. Kronholm, J. Laulainen, D. Mansfeld, O. Tarvainen, *Phys. Plasmas*, **22** (8), 083509 (2015). DOI: 10.1063/1.4928428
- [2] A. Kitagawa, S. Biri, Y. Kato, M. Muramatsu, R. Rácz, W. Takasugi, in *22nd Int. Workshop on ECR ion sources (ECRIS)* (Busan, Korea, 2016), p. 55–58. DOI: 10.18429/JACoW-ECRIS2016-WEAO03
- [3] 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
- [4] A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, I.V. Izotov, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **62** (6), 065005 (2020). DOI: 10.1088/1361-6587/ab7f98
- [5] M.I. Petelin, *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, **38** (11), 1387 (2017). DOI: 10.1007/s10762-017-0423-9

- [6] M. Thumm, J. Infrared Milli. Terahz. Waves, **41** (1), 1 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00631-y>
- [7] N.S. Ginzburg, G.S. Nusinovich, N.A. Zavolsky, Int. J. Electron., **61** (6), 881 (1986). DOI: 10.1080/00207218608920927
- [8] T.H. Chang, S.H. Chen, L.R. Barnett, K.R. Chu, Phys. Rev. Lett., **87** (6), 064802 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.064802
- [9] S. Alberti, J.-Ph. Ansermet, K.A. Avramides, F. Braunmueller, P. Cuanillon, J. Dubray, D. Fasel, J.-Ph. Hogge, A. Macor, E. de Rijk, M. da Silva, M.Q. Tran, T.M. Tran, Q. Vuillemin, Phys. Plasmas, **19** (12), 123102 (2012). DOI: 10.1063/1.4769033
- [10] Р.М. Розенталь, А.Э. Федотов, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.Б. Волков, С.В. Самсонов, Е.С. Семенов, А.С. Сергеев, Письма в ЖТФ, **45** (10), 38 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.10.47755.17746
- [11] Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, Р.М. Розенталь, Письма в ЖТФ, **28** (9), 85 (2002).
- [12] R.M. Rozental, N.S. Ginzburg, M.Y. Glyavin, A.S. Sergeev, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **54** (6), 2741 (2006). DOI: 10.1109/TMTT.2006.874876
- [13] М.В. Белоглазкина, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Письма в ЖТФ, **32** (12), 1 (2006).
- [14] Р.М. Розенталь, Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, ЖТФ, **76** (1), 82 (2006).
- [15] Н.М. Рыскин, В.Н. Титов, Изв. вузов. Радиофизика, **44** (10), 860 (2001).
- [16] Р.М. Розенталь, Н.С. Гинзбург, А.С. Сергеев, Изв. вузов. Радиофизика, **50** (12), 1043 (2007).
- [17] N.M. Ryskin, V.N. Titov, O.V. Umantsiva, IEEE Trans. Plasma Sci., **44** (8), 1270 (2016). DOI: 10.1109/TPS.2016.2517002
- [18] S.V. Samsonov, G.G. Denisov, V.L. Bratman, A.A. Bogdashov, M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin, V.K. Lygin, M.K. Thumm, IEEE Trans. Plasma Sci., **32** (3), 884 (2004). DOI: 10.1109/TPS.2004.828871
- [19] V.V. Parshin, Int. J. Infrared Milli. Waves, **15** (2), 339 (1994). DOI: 10.1007/BF02096245