

13.4

Влияние флуктуаций ускоряющего напряжения на ширину области синхронизации гиротрона мегаваттного уровня мощности

© Р.М. Розенталь, А.П. Фокин

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

Поступило в Редакцию 9 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 8 февраля 2024 г.

Принято к публикации 14 февраля 2024 г.

Для гиротрона диапазона 170 GHz с уровнем выходной мощности 2 MW выполнены расчеты режима генерации в рамках метода крупных частиц. Расчеты проводились в эквивалентной осесимметричной модели гиротрона, при этом учитывались флуктуации энергии электронов за счет колебаний выходного напряжения высоковольтного источника питания. Рассчитанная таким образом ширина спектра выходного излучения (около 1 MHz) совпадает с экспериментальными данными. При помощи данной модели показано, что в задаче захвата гиротрона внешним сигналом учет флуктуаций напряжения приводит к уменьшению ширины расчетной области синхронизации: при мощности внешнего сигнала 20 kW — на 13%, а при 5 kW — на 27%.

Ключевые слова: гиротрон, синхронизация внешним сигналом, миллиметровое излучение.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.10.57707.19797

Одним из ключевых элементов установок управляемого термоядерного синтеза, основанных на микроволновом нагреве плазмы, являются гиротроны, способные обеспечить в миллиметровом диапазоне непрерывную генерацию излучения мегаваттного уровня мощности [1,2]. В свою очередь одной из важных задач при создании таких гиротронов является стабилизация частоты их генерации. В настоящее время развиваются два подхода к решению данной задачи. Один из них основан на создании схем автоподстройки частоты за счет изменения параметров электронного потока [3]. Другой подход основан на использовании внешнего генератора, обеспечивающего захват колебаний мощного гиротрона [4–7]. При этом в качестве внешнего генератора используется гиротрон с меньшей мощностью со схемой стабилизации частоты [8].

В настоящей работе представлены результаты расчетов гиротрона диапазона 170 GHz в режиме воздействия на него внешнего сигнала. Основное отличие от предшествующих работ заключается в учете конечной ширины спектра гиротрона, которая определяется наличием флуктуаций энергии электронного потока. Следует отметить, что в недавней работе [9] рассматривалось влияние ряда характеристик пучка (начальный разброс электронов по поперечным скоростям, конечная толщина пучка, смещение оси инжекции пучка относительно оси резонатора), присущих реальному эксперименту, на эффективность гиротрона в автономном режиме работы и в режиме захвата внешним сигналом. Однако вопрос влияния данных характеристик на ширину области захвата не рассматривался.

Рассмотрим гиротрон диапазона 170 GHz, запитываемый электронным потоком с энергией 100 keV и током 50 A, в котором возбуждается рабочая мода $TE_{m,p}$ с

азимутальным индексом $m = 28$ и радиальным индексом $p = 12$ [10]. Для высоковольтных источников питания гиротронов требования к величине флуктуаций ускоряющего напряжения устанавливаются на уровне не более 1% [11,12], при этом на практике их стараются ограничить величиной в несколько десятых долей процента [13]. Известно, что такие флуктуации порождают флуктуации частоты генерации гиротрона [14,15], наблюдаемые в эксперименте. На рис. 1, а представлен экспериментально измеренный спектр мощного гиротрона, работающего на частоте $f_0 = 169.907$ GHz. Видно, что характерная ширина спектра составляет около 1 MHz.

Моделирование гиротрона выполнялось методом крупных частиц с использованием программного кода KARAT [16]. Для снижения времени расчетов задача трехмерного моделирования гиротрона с рабочей модой несимметричного типа сводилась к 2.5-мерной [17]. С этой целью осуществлялся подбор эквивалентной осесимметричной моды, имеющей близкий коэффициент связи с электронным пучком:

$$G_{mp} = \frac{J_{m-1}^2(v_{mp}R_{beam}/R_0)}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)}, \quad (1)$$

где v_{mp} — p -й корень уравнения $J'_m(v) = 0$, $J_m(x)$ — функция Бесселя, R_0 , R_{beam} — радиусы однородного участка резонатора и радиус инжекции электронного пучка. Для исследуемого гиротрона наиболее подходящей модой является $TE_{M,P}$ с азимутальным индексом $M = 0$ и радиальным индексом $P = 13$, отличие коэффициента связи которой составляет около 4%. Профиль резонатора в эквивалентной задаче пересчитывается по формуле

$$R_{0,13}(z) = \frac{v_{0,13}}{v_{28,12}} R_{28,12}(z), \quad (2)$$

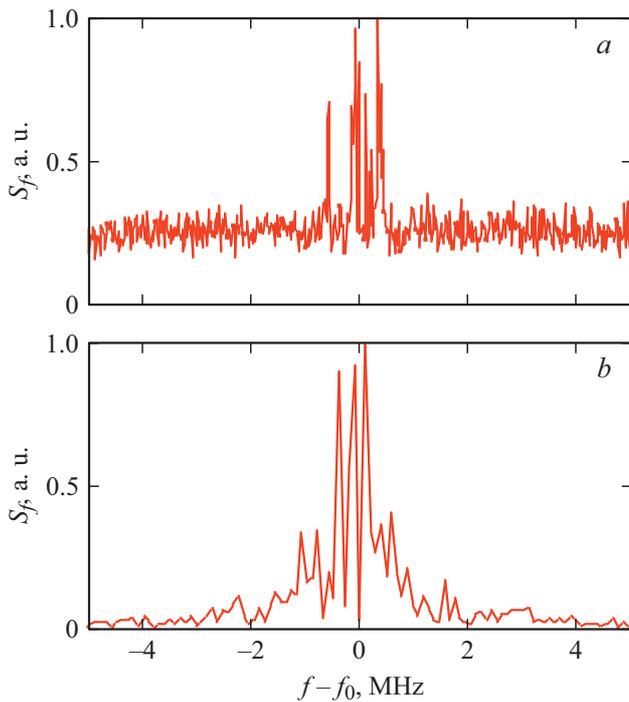


Рис. 1. Экспериментально измеренный (а) и полученный при моделировании (б) спектр выходного излучения гиротрона.

где $R_{0,13}(z)$, $R_{28,12}(z)$ — зависимости радиуса резонатора от продольной координаты в эквивалентном и исходном гиротроне соответственно. Изменение профиля резонатора влечет за собой изменение добротности рабочего колебания. Кроме того, для увеличения скорости расчетов границы электродинамической системы предполагались идеально проводящими, в результате чего в моделировании не учитывались омические потери. Однако для исследуемого гиротрона в силу значительного превышения омической добротности над величиной дифракционной добротности при использовании описанных приближений итоговое различие добротностей составляет лишь около 1.5%, что не оказывает существенного влияния на конечный результат расчетов.

В моделировании винтовой электронный пучок с питч-фактором (отношением поперечной и продольной скоростей электронов), равным 1.2, возбуждал резонатор гиротрона на моде $TE_{0,13}$ и после окончания взаимодействия осаждался на стенку электродинамической системы на участке спада ведущего магнитного поля. Максимальная расчетная мощность генерации гиротрона составляла 2.1 MW. Частота генерации при этом составляла $f_0 \approx 169.93$ GHz. Моделирование выполнялось на временах около $5 \mu s$. В ходе расчетов начальная энергия электронного потока каждые 100 ns менялась случайным образом в диапазоне ± 0.2 keV, в результате чего ширина спектра излучения гиротрона, так же как и в эксперименте, составляла около 1 MHz (рис. 1, б). При подаче в гиротрон внешнего сигнала на частоте $f_{ext} = f_0$ при уровнях мощности $P_{ext} \geq 5$ kW

спектр излучения становился практически неотличимым от спектра в гиротроне без флуктуаций начальной энергии частиц [17]. Ширина спектра при этом имела величину около 0.2 MHz, равную обратному времени длительности рассчитываемой реализации, что хорошо видно из рис. 2, с, d, где представлены спектрограммы выходного излучения гиротрона.

Значительный практический интерес представляет исследование динамики гиротрона в условиях отстройки внешней частоты f_{ext} от величины собственной частоты генерации f_0 . Прежде всего это связано с точностью изготовления резонаторов гиротрона, вследствие чего собственная частота генерации мощного гиротрона и внешнего источника могут различаться, а также с необходимостью изменения режима генерации мощного гиротрона в процессе работы. Напомним, что в идеальной системе при изменении f_{ext} существует область захвата, в которой частота генерации равна частоте внешнего сигнала. При выходе из этой области возникает многочастотный режим генерации. Расстояние между спектральными компонентами при этом меняется от нулевого значения на границе области захвата до значения $|f_{ext} - f_0|$ при бесконечном удалении от границы [18,19]. В простейшем случае ширина области захвата пропорциональна амплитуде внешнего воздействия и обратно пропорциональна добротности резонатора.

Для исследования ширины области захвата гиротрона внешним сигналом рабочая точка гиротрона (ток и средняя энергия электронного пучка, величина ведущего магнитного поля) фиксировалась, а частота внешнего сигнала изменялась в пределах 169.9–169.935 GHz. На рис. 2, а, б показаны спектрограммы выходного излучения гиротрона при инжекции моноэнергетического винтового электронного пучка. В этом случае границы области захвата составляют $f_{ext} = 169.918$ – 169.929 GHz при мощности внешнего сигнала 5 kW (рис. 2, а) и $f_{ext} = 169.907$ – 169.933 GHz при величине внешнего сигнала 20 kW (рис. 2, б). За пределами области захвата система переходит в режим многочастотной генерации. Спектрограммы выходного излучения при наличии флуктуаций энергии пучка представлены на рис. 2, с, d. Видно, что в случае мощности внешнего сигнала 5 kW происходит смещение границ области захвата до значений $f_{ext} = 169.919$ – 169.928 GHz (рис. 2, с), т.е. ширина полосы захвата уменьшается с 11 до 8 MHz. При мощности внешнего сигнала 20 kW границы полосы захвата смещаются до значений $f_{ext} = 169.910$ – 169.933 GHz (рис. 2, d), т.е. ширина полосы уменьшается с 26 до 23 MHz. В относительных единицах сужение полосы захвата для величины внешнего сигнала 5 kW составляет около 27%, а для величины внешнего сигнала 20 kW — около 13%.

Таким образом, можно сделать вывод, что флуктуации ускоряющего напряжения оказывают заметное влияние на процессы синхронизации, особенно при малых значениях мощности внешнего сигнала, вследствие чего

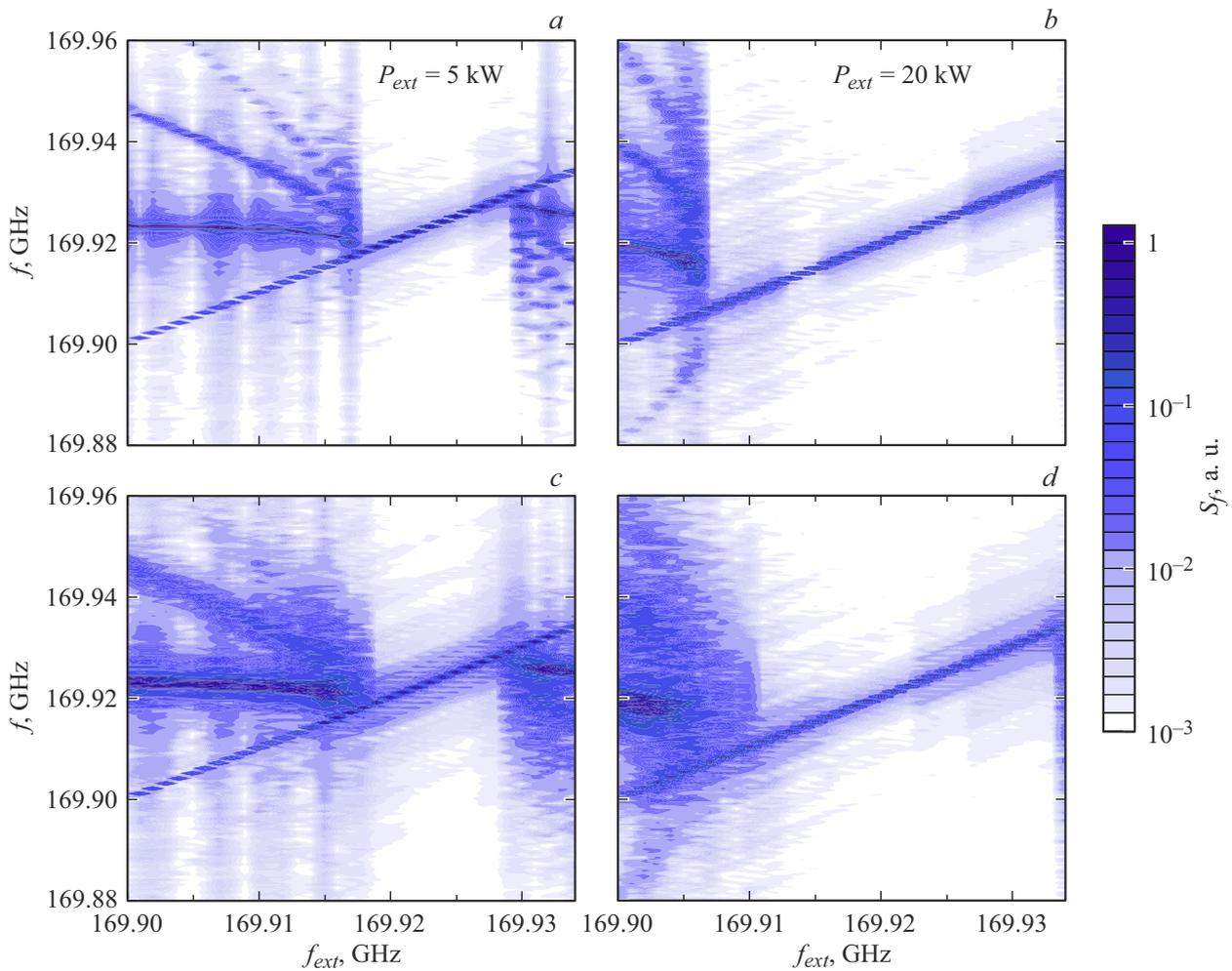


Рис. 2. Спектрограммы гиротрона при отсутствии флуктуаций ускоряющего напряжения (*a, b*) и при их наличии (*c, d*). В левом столбце приведены данные для мощности внешнего сигнала $P_{ext} = 5$ kW, в правом столбце — для $P_{ext} = 20$ kW.

целесообразно учитывать данное влияние при проектировании мощных гиротронов, работающих в режиме захвата внешним сигналом.

В заключение следует отметить, что предложенный способ моделирования может быть использован и для более высокочастотных гиротронов, разрабатываемых в настоящее время для проекта установки термоядерного синтеза следующего поколения DEMO [20]. Для таких гиротронов потребуется осуществить выбор подходящей эквивалентной модели, при этом сам подход к моделированию, очевидно, останется неизменным. Также подобное моделирование может быть использовано в задаче, в которой селективное возбуждение колебаний на рабочей моде реализуется только при наличии внешнего синхронизирующего источника [21].

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.Н. Куфтину и Е.М. Таю за предоставление экспериментальных данных и участие в обсуждении материалов статьи.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №19-79-30071).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.K.A. Thumm, G.G. Denisov, K. Sakamoto, M.Q. Tran, Nucl. Fusion, **59** (7), 073001 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab2005
- [2] A.G. Litvak, G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, IEEE J. Microwaves, **1** (1), 260 (2021). DOI: 10.1109/JMW.2020.3030917
- [3] L. Krier, K.A. Avramidis, H. Braune, G. Gantenbein, S. Illy, J. Jelonnek, H.P. Laqua, S. Marsen, D. Moseev, F. Noke, T. Ruess, T. Stange, M. Thumm, R.C. Wolf, W7-X Team, Fusion Eng. Des., **192**, 113828 (2023). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2023.113828

- [4] В.Л. Бакунин, Г.Г. Денисов, Ю.В. Новожилова, Письма в ЖТФ, **40** (9), 41 (2014). [V.L. Bakunin, G.G. Denisov, Yu.V. Novozhilova, Tech. Phys. Lett., **40** (5), 382 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014050034].
- [5] К.А. Якунина, А.Р. Кuznetsov, N.M. Ryskin, Phys. Plasmas, **22** (11), 113107 (2015). DOI: 10.1063/1.4935847
- [6] И.В. Зотова, Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев, Изв. вузов. Радиофизика, **58** (9), 759 (2015). [I.V. Zotova, N.S. Ginzburg, G.G. Denisov, R.M. Rozental', A.S. Sergeev, Radiophys. Quantum Electron., **58** (9), 684 (2016). DOI: 10.1007/s11141-016-9640-7].
- [7] G. Denisov, A. Kuftin, V. Manuilov, A. Chirkov, L. Popov, V. Zapevalov, A. Zuev, A. Sedov, I. Zheleznov, M. Glyavin, Nucl. Fusion, **62** (3), 036020 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac4946
- [8] A.N. Kuftin, G.G. Denisov, A.V. Chirkov, M.Yu. Shmelev, V.I. Belousov, A.A. Ananichev, B.Z. Movshevich, I.V. Zotova, M.Yu. Glyavin, IEEE Electron Dev. Lett., **44** (9), 1563 (2023). DOI: 10.1109/LED.2023.3294755
- [9] V.L. Bakunin, M.Yu. Glyavin, G.G. Denisov, Yu.V. Novozhilova, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, **44** (7-8), 516 (2023). DOI: 10.1007/s10762-023-00930-5
- [10] V.E. Myasnikov, M.V. Agapova, A.N. Kuftin, V.E. Zapevalov, G.G. Denisov, V.I. Ilin, L.M. Belnova, A.V. Chirkov, A.P. Gnedenkov, A.G. Litvak, V.I. Malygin, in *2013 38th Int. Conf. on infrared, millimeter, and terahertz waves (IRMMW-THz)* (IEEE, 2013), p. 1-2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665557
- [11] D. Fasel, F. Albajar, T. Bonicelli, A. Perez, L. Rinaldi, U. Siravo, L. Sita, G. Taddia, Fusion Eng. Des., **86** (6-8), 872 (2011). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.02.017
- [12] S.X. Ma, M. Zhang, L.L. Xia, Z. Zeng, X.L. Zhang, C.L. Wang, K.X. Yu, IEEE Trans. Plasma Sci., **42** (3), 656 (2014). DOI: 10.1109/TPS.2014.2300506
- [13] Г.Г. Денисов, В.И. Мальгин, А.И. Цветков, А.Г. Еремеев, М.Ю. Шмелев, В.И. Белоусов, И.С. Бабер, Н.И. Карпов, И.И. Леонов, Е.А. Копелович, М.М. Троицкий, М.В. Кузнецов, И.А. Варьгин, К.А. Журинов, Б.З. Мовшевич, А.В. Чирков, М.Ю. Глявин, Е.М. Тай, Е.А. Солюянова, М.И. Бакулин, И.Н. Рой, И.О. Анашкин, П.П. Хвостенко, Н.А. Кирнева, Изв. вузов. Радиофизика, **63** (5-6), 369 (2020). [G.G. Denisov, V.I. Malygin, A.I. Tsvetkov, A.G. Eremeev, M.Yu. Shmelev, V.I. Belousov, I.S. Baber, N.I. Karpov, I.I. Leonov, E.A. Kopelovich, M.M. Troitskiy, M.V. Kuznetsov, I.A. Varygin, K.A. Zhurin, B.Z. Movshevich, A.V. Chirkov, M.Yu. Glyavin, E.M. Tai, E.A. Soluyanov, M.I. Bakulin, I.N. Roy, I.O. Anashkin, P.P. Khvostenko, N.A. Kirneva, Radiophys. Quantum Electron., **63** (5-6), 332 (2020). DOI: 10.1007/s11141-021-10058-y].
- [14] В.С. Ергаков, А.А. Шапошников, Изв. вузов. Радиофизика, **20** (8), 1209 (1977). [V.S. Ergakov, A.A. Shaposhnikov, Radiophys. Quantum Electron., **20** (8), 840 (1977). DOI: 10.1007/BF01038794].
- [15] O. Dumbrajs, G.S. Nusinovich, Phys. Plasmas, **4** (5), 1413 (1997). DOI: 10.1063/1.872345
- [16] V.P. Tarakanov, EPJ Web Conf., **149**, 04024 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/20171490
- [17] Р.М. Розенталь, Е.М. Тай, В.П. Тараканов, А.П. Фокин, Изв. вузов. Радиофизика, **65** (5-6), 420 (2022). [R.M. Rozental, E.M. Tai, V.P. Tarakanov, A.P. Fokin, Radiophys. Quantum Electron., **65** (5-6), 384 (2022). DOI: 10.1007/s11141-023-10221-7].
- [18] R. Adler, Proc. IRE, **34** (6), 351 (1946). DOI: 10.1109/JRPROC.1946.229930
- [19] В.Л. Бакунин, Г.Г. Денисов, Ю.В. Новожилова, Изв. вузов. Радиофизика, **62** (7), 549 (2019). [V.L. Bakunin, G.G. Denisov, Yu.V. Novozhilova, Radiophys. Quantum Electron., **62** (7), 490 (2019). DOI: 10.1007/s11141-020-09995-x].
- [20] G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, A.P. Fokin, A.N. Kuftin, A.I. Tsvetkov, A.S. Sedov, E.A. Soluyanov, M.I. Bakulin, E.V. Sokolov, E.M. Tai, M.V. Morozkin, M.D. Proyavin, V.E. Zapevalov, Rev. Sci. Instrum., **89** (8), 084702 (2018). DOI: 10.1063/1.5040242
- [21] V.L. Bakunin, G.G. Denisov, Yu.V. Novozhilova, IEEE Electron Dev. Lett., **41** (5), 777 (2020). DOI: 10.1109/LED.2020.2980218