

12;13

Уменьшение ширины спектра излучения гиротрона при использовании внешних отражений

© А.А. Богдашов¹, М.Ю. Глявин¹, Р.М. Розенталь^{1,¶}, А.П. Фокин¹,
В.П. Тараканов^{2,3}

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
Москва, Россия

³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

¶ E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 8 сентября 2017 г.

В рамках прямого моделирования PIC (particle in cell) показано стабилизирующее действие внешних отражений на работу гиротрона. Впервые использована модель с длительностью временной реализации, позволяющей рассчитывать частотные характеристики с относительной точностью не хуже $2 \cdot 10^{-6}$. В гиротроне диапазона 28 GHz экспериментально продемонстрировано почти двукратное уменьшение ширины спектра при введении отражений выходного сигнала.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.05.45712.17032

В последнее время усилился интерес к задачам, связанным с уменьшением ширины спектра излучения гиротронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Методы влияния на спектральные свойства излучения при этом можно разделить на две группы:

1) активные методы, при использовании которых применяется управление параметрами электронного пучка (ускоряющим или модулирующим напряжением, ведущим магнитным полем);

2) пассивные методы, основанные на воздействии внешнего фиксированного сигнала или отраженного излучения на режим генерации гиротрона.

Активные методы получили развитие в ряде работ [1–3]. При этом последние экспериментальные исследования в данном направлении продемонстрировали возможность снижения ширины спектра в гиро-

троне с рабочей частотой 263 GHz до значений в единицы герц, что соответствует относительной ширине линии генерации $\sim 4 \cdot 10^{-12}$ [4].

Пассивные методы, основанные на захвате частоты генерации внешним сигналом [5,6], достаточно сложны в практической реализации, поскольку требуют наличия СВЧ-источника достаточно большой мощности. Гораздо более доступны для исследования методы, основанные на введении отражений части выходного излучения, снижающие зависимость частоты генерации от внешних параметров [7]. В работе [8] в рамках нестационарной модели гиротрона с нефиксированной структурой поля было показано, что введение отражения части выходного излучения от удаленной нерезонансной нагрузки приводит к значительному сужению спектра излучения в условиях флуктуации энергии электронного пучка. Задача настоящей работы состоит в исследовании стабилизирующего влияния внешних отражений на работу гиротрона как в рамках прямого численного PIC-моделирования повышенной точности (PIC — particle in cell), так и на основе экспериментального исследования применительно к технологическому гиротрону диапазона 28 GHz.

Известно, что для улучшения стабилизации необходимо увеличивать коэффициент отражения. Однако при этом существует опасность перехода к нестационарным режимам генерации, поскольку сформированная запаздывающая обратная связь уменьшает бифуркационные значения токов [9,10]. Согласно данным работы [11], в которой рассматривалась модель гиротрона с предельно низкой дифракционной добротностью, наличие отражений выходного сигнала с уровнем порядка 20% по мощности создает условия для реализации нестационарных режимов генерации. Кроме того, в длинноимпульсных и непрерывных гиротронах большие отражения увеличивают тепловую нагрузку на элементы электродинамической системы (прежде всего на вакуумное окно) и могут создавать условия для возникновения неустойчивостей в электронно-оптической системе. С учетом этого коэффициент отражения в данной работе был выбран на уровне 10%.

Моделирование электронно-волнового взаимодействия было проведено на основе метода крупных частиц. Параметры моделирования соответствовали характеристикам экспериментального стенда непрерывного технологического гиротрона диапазона 28 GHz с рабочей модой TE_{02} на второй циклотронной гармонике [12]. В силу аксиальной симметрии пространства взаимодействия для моделирования использовалась

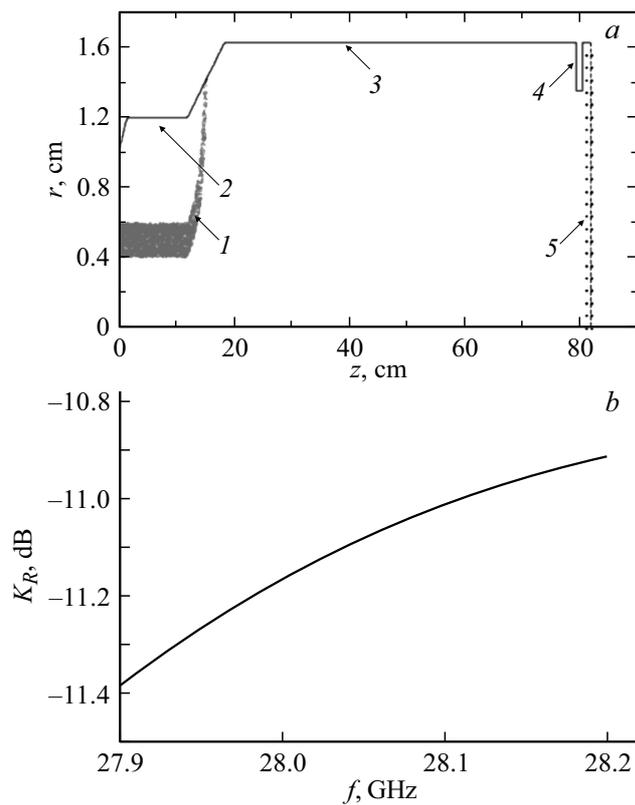


Рис. 1. *a* — геометрия пространства взаимодействия в PIC-моделировании: 1 — электронный пучок, 2 — резонатор, 3 — выходной волноведущий тракт, 4 — отражатель, 5 — поглощающий слой; *b* — расчетная частотная зависимость коэффициента отражений рабочей моды TE_{02} .

2.5-мерная версия PIC кода KARAT [13,14]. Геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц представлены на рис. 1, *a*. Винтовой электронный пучок с энергией 20 keV, током 0.5 A, питч-фактором 1.8 и начальным разбросом по поперечным скоростям 20% инжектировался в резонатор гиротрона с радиусом встрела, соответствующим максимуму коэффициента связи с рабочей модой.

После окончания взаимодействия электроны высаживались на стенку электродинамической системы за счет введения спадающего участка магнитного поля.

В эксперименте пассивный нерезонансный отражатель представлял собой диафрагму в секционированном круглом волноводе, установленную между гиротроном и калориметрической СВЧ-нагрузкой. Электродинамический расчет диафрагмы, обеспечивающей уровень отражения 8%, выполнялся методом конечных разностей во временной области FDTD [15] с заданием на концах волновода слоев поглотителя UPML [16]. Частотная зависимость коэффициента отражения по мощности изображена на рис. 1, *b*.

Расстояние от окончания раскрытия резонатора до отражающей диафрагмы составляло $L_R \approx 60$ см. Для симуляции безотражательных условий излучения на коллекторном конце пространства взаимодействия размещался поглощающий слой с переменной проводимостью, коэффициент отражения от которого не превышал 1% от мощности падающего излучения.

Следует отметить, что реальные значения периодов флуктуации ускоряющего напряжения достигают миллисекундных значений. Кроме того, подобные флуктуации могут характеризоваться сложным спектральным составом. В связи с этим прямой расчет спектральных характеристик гиротрона в настоящее время не представляется возможным. В силу этого влияние отражений на ширину спектра рассчитывалось косвенным образом через вычисление частоты генерации гиротрона. Для достижения относительной точности расчета частоты на уровне $2 \cdot 10^{-6}$, что соответствовало точности измерения частоты в эксперименте, вычисления в PIC-моделировании выполнялись до значений времени $20 \mu\text{s}$.

В моделировании положение отражателя варьировалось в пределах периода изменения электродинамических свойств системы, равного половине волноводной длины волны [17], что составляло величину $\lambda_w/2 \approx 8$ мм. При каждом положении отражателя строилась зависимость частоты генерации от магнитного поля и рассчитывался коэффициент стабилизации $k_{st} = \Delta f / \Delta f_0$, где Δf — изменение частоты при относительном изменении величины магнитного поля $\sim 0.2\%$ в окрестности максимума мощности генерации при наличии отражателя, $\Delta f_0 \approx 1.1$ МГц — та же величина в отсутствие отражателя. Результаты расчетов показывают, что в диапазоне $L_R = 60.1\text{--}60.4$ см при благо-

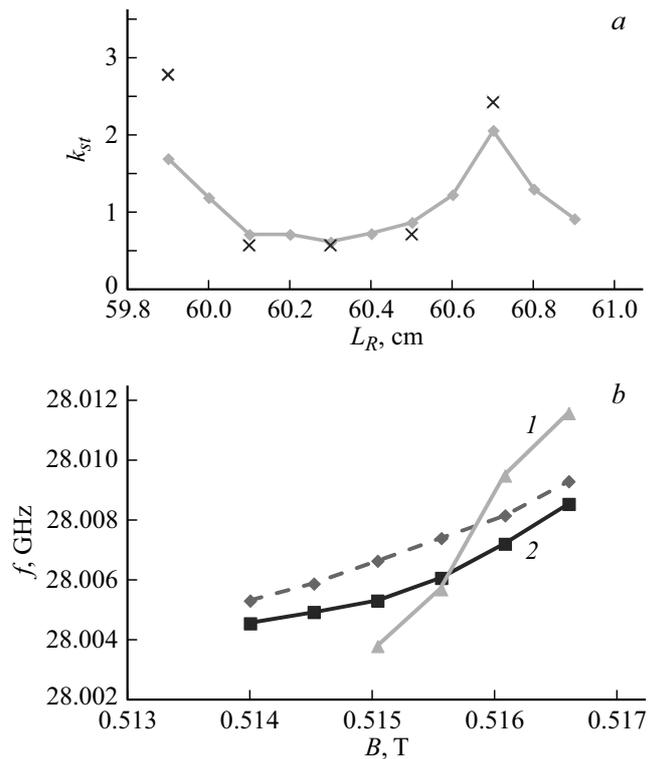


Рис. 2. *a* — зависимость коэффициента стабилизации от расстояния до отражателя: сплошная линия — PIC-моделирование, крестики — экспериментальные данные; *b* — экспериментальные зависимости частоты генерации от магнитного поля: штриховая линия — безотражательная конфигурация, *1* — неблагоприятная фазировка отражателя при $L_R = 59.9$ см, *2* — благоприятная фазировка отражателя при $L_R = 60.3$ см.

приятной фазировке отражателя коэффициент стабилизации достигает значений $k_{st} \approx 0.6-0.7$ (рис. 2, *a*, сплошная линия). В свою очередь за пределами этого диапазона коэффициент стабилизации возрастает и при самой неблагоприятной фазировке отражателя достигает значений $k_{st} \approx 2.0$.

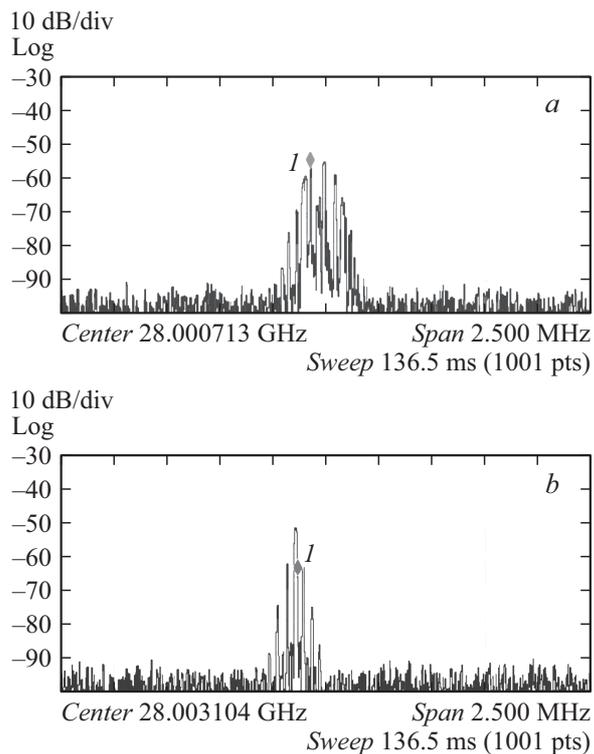


Рис. 3. Спектр излучения гиротрона: *a* — в безотражательной конфигурации, *b* — при благоприятной фазировке отражателя. *I* — частотная метка спектроанализатора.

В экспериментальных исследованиях изменение расстояния L_R осуществлялось путем добавления проставочных колец с шагом 2 мм. Для измерения частоты генерации часть выходного сигнала подавалась на вход спектроанализатора. На рис. 2, *b* показаны полученные зависимости частоты генерации от магнитного поля. При неблагоприятной фазировке, соответствующей значениям $L_R = 59.9$ и 60.7 см, граница генерации смещалась вверх по магнитному полю, а изменение частоты более чем в 2 раза превышало аналогичное значение для безотражательной конфигурации. Область благоприятной фазировки располагалась

в диапазоне $L_R = 60.1\text{--}60.5$ см, коэффициент стабилизации при этом достигал значений $k_{st} \approx 0.6\text{--}0.7$ (рис. 2, *a*), что хорошо согласуется с расчетными значениями. Следует отметить, что стабилизация имеет место только вблизи границы зоны генерации, соответствующей максимуму выходной мощности. При увеличении магнитного поля выше значений $B = 0.515$ Т коэффициент стабилизации возрастает и даже может быть больше единицы.

В силу зависимости циклотронной частоты как от магнитного поля, так и от энергии частиц снижение чувствительности частоты генерации к изменениям магнитного поля должно приводить и к уменьшению уширения спектра, вызванного флуктуациями ускоряющего напряжения. Данное предположение подтверждается результатами измерения формы спектра выходного излучения гиротрона. В безотражательной конфигурации ширина спектра составляла ~ 3.1 МГц (рис. 3, *a*), в то время как при введении отражений с благоприятной фазировкой наблюдалось уменьшение ширины спектра до ~ 1.9 МГц (рис. 3, *b*). Видно, что отношение данных значений соответствует измеренному коэффициенту стабилизации ~ 0.6 .

Таким образом, впервые экспериментально продемонстрирована возможность уменьшения ширины спектра генерации гиротрона за счет использования пассивной схемы стабилизации, основанной на отражении части выходного излучения. Экспериментальные результаты согласуются с данными, полученными с использованием прямого PIC-моделирования на основе кода KARAT, что позволяет в дальнейшем использовать данный подход для анализа режимов работы гиротронов с отражением части выходной мощности, в том числе в перспективных схемах с планарной конфигурацией пространства взаимодействия [18].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-02-00183).

Список литературы

- [1] Голубятников Г.Ю., Крупнов А.Ф., Лубяко Л.В., Лучинин А.Г., Павельев А.Б., Петелин М.И., Fernandez Curto A. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 15. С. 13–17.
- [2] Khutoryan E.M., Idehara T., Kuleshov A.N., Tatematsu Y., Yamaguchi Y., Matsuki Y., Fujiwara T. // J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. 2015. V. 36. N 12. P. 1157–1163.

- [3] *Idehara T., Mitsudo S., Ogawa I.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. N 3. P. 910–916.
- [4] *Denisov G.G., Fokin A.P., Glyavin M.Yu., Golubiatnikov G.Yu., Lubyako L.V., Morozkin M.V., Movshevich B.Z., Tsvetkov A.I.* // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. P. 04022.
- [5] *Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 9. С. 41–47.
- [6] *Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Рыскин Н.М., Бакунин В.Л., Богдашов А.А., Мельникова М.М., Фокин А.П.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25. № 1. С. 4–34.
- [7] *Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л., Новожилова Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 13. С. 25–32.
- [8] *Зотова И.В., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Розенталь Р.М., Сергеев А.С.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 9. С. 759–769.
- [9] *Glyavin M.Yu., Zarevalov V.E.* // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1998. V. 19. N 11. P. 1499–1511.
- [10] *Гинзбург Н.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Моисеев М.А., Новожилова Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 11. С. 53–59.
- [11] *Airila M.I., Käll P.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2004. V. 52. N 2. P. 522–528.
- [12] *Вуков Ю., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. N 1. P. 67–72.
- [13] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield, BRA, 1992.
- [14] *Тараканов В.П.* // Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456.
- [15] *Yee K.* // IEEE Trans. Antennas Propagation. 1966. V. 14. N 3. P. 302–307.
- [16] *Gedney S.D.* // IEEE Trans. Antennas Propagation. 1996. V. 44. N 12. P. 1630–1639.
- [17] *Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 1. С. 82–85.
- [18] *Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Заславский В.Ю., Сергеев А.С., Железнов И.В.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 2. С. 62–70.