

УДК 537.862+621.373.423

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ПЛАВНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ В ГИРОТРОНАХ С УКОРОЧЕННЫМ РЕЗОНАТОРОМ

М. Ю. Глявин<sup>1</sup>, А. Э. Федотов<sup>1</sup>, И. В. Зотова<sup>1</sup>, А. Г. Лучинин<sup>1</sup>, М. Д. Проявин<sup>1</sup>,  
Р. М. Розенталь<sup>1\*</sup>, В. П. Тараканов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва;

<sup>3</sup> Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Экспериментально показана возможность существенного расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах при использовании резонатора с уменьшенной длиной. За счёт снижения чувствительности процесса электронно-волнового взаимодействия к разбросу скоростей в электронном пучке можно повысить мощность генерации на высоких продольных модах до уровня, сравнимого с мощностью излучения при возбуждении моды с одной продольной вариацией. Перекрытие полос генерации на соседних продольных модах при этом достигается за счёт увеличения тока электронного пучка. В проведённом эксперименте в гиротроне с рабочей частотой около 12 ГГц продемонстрирована полоса перестройки частоты более 4% при киловаттном уровне мощности выходного излучения в большей её части. Полученные результаты открывают возможность разработки перестраиваемых высокочастотных гиротронов средней мощности.

Гиротроны являются наиболее мощными источниками излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [1, 2]. В то же время особенностью этих приборов является достаточно узкая (доли процента) полоса перестройки по частоте, что ограничивает сферу их применения, например в перспективных спектроскопических приложениях [3, 4]. Основным препятствием для реализации в высокоэффективных гиротронах большой перестройки частоты является высокая добротность рабочего колебания с одной ( $q = 1$ ) продольной вариацией поля в пространстве взаимодействия, что обусловлено, главным образом, близостью резонансной точки к критической частоте волновода. Поэтому для обеспечения плавной частотной перестройки часто используют возбуждение относительно низкодобротных продольных мод с несколькими вариациями ( $q > 1$ ) в длинных резонаторах с увеличенной плотностью спектра указанных мод [5–7]. При этом плавная перестройка частоты достигается за счёт перекрытия резонансных кривых соседних продольных мод [5–8]. Однако при увеличении длины резонатора в высокочастотных гиротронах существенно возрастает доля омических потерь. Кроме того, для длинного резонатора повышается чувствительность электронно-волнового взаимодействия к разбросу скоростей в электронном пучке при работе на модах с большими продольными волновыми числами [9, 10]. Обе указанные причины ведут к резкому падению мощности генерации уже на продольных модах с  $q = 2, 3$  и, как следствие, ограничивают возможную ширину полосы перестройки по частоте.

В работе [11] было показано, что перечисленные проблемы могут быть решены при использовании коротких резонаторов с длиной в несколько раз меньшей, чем оптимальная с точки зрения достижения максимального коэффициента полезного действия (КПД). Очевидно, что вследствие этого существенно снижается чувствительность работы гиротрона на высоких продольных модах к разбросу скоростей, который при короткой длине пространства взаимодействия не успевает сказаться на азимутальной группировке электронов [9]. В то же время при укорочении резонатора

\* rrz@appl.sci-nnov.ru

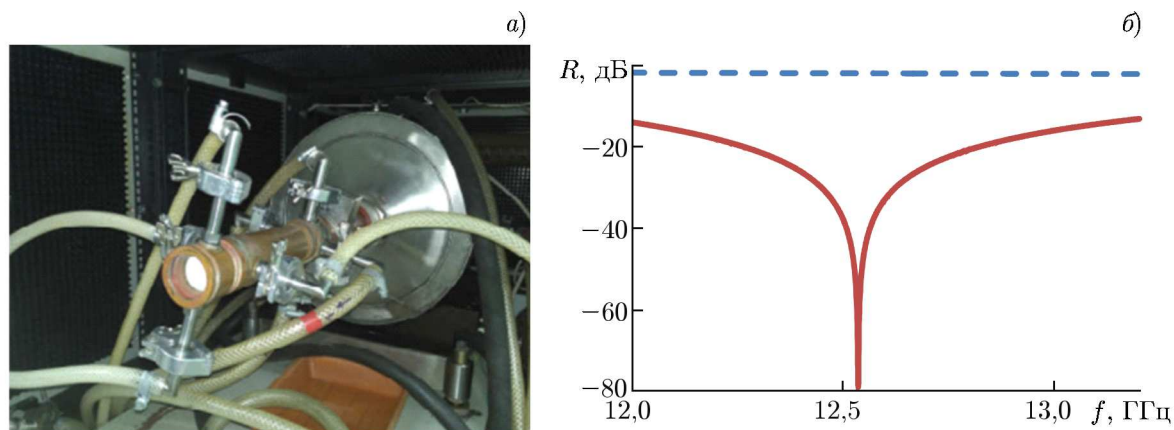


Рис. 1. Внешний вид исследуемого гиротрона со стороны выходного вакуумного окна (а). Частотная зависимость коэффициента отражения от вакуумного окна на моде  $TE_{21}$  в отсутствии просветляющей пластины (штриховая линия) и при её наличии (сплошная линия) (б)

необходимо увеличить ток запитывающего гиротрон электронного пучка для обеспечения стартовых условий при возбуждении высоких продольных мод. Отметим, что требуемая величина тока может быть существенно снижена при переходе к работе на низких поперечных модах за счёт роста коэффициента связи электронов с волной. Указанные соображения позволяют рассчитывать на то, что при определённой оптимизации перечисленные подходы могут обеспечить достаточно широкую полосу генерации гиротрона.

В данной работе представлены результаты эксперимента, подтверждающие сделанные в [11] предположения. Эксперимент проводился на основе технологического гиротрона [12], запитываемого винтовым электронным пучком с энергией частиц 20 кэВ, током 2 А и пич-фактором порядка 1,5. В рабочем режиме частота генерации указанного гиротрона составляет 28 ГГц. При этом возбуждается мода  $TE_{02}$  на второй гармонике гирочастоты. Идея эксперимента заключалась в переходе (за счёт небольшого снижения ведущего магнитного поля) к работе на основном циклотронном резонансе с возбуждением моды  $TE_{21}$ . Соответственное снижение частоты генерации до 12 ГГц приводит к уменьшению нормированной длины пространства взаимодействия, которая в теории гиротронов [13] определяется как  $\mu = \pi \beta_{\perp 0}^2 L / (\beta_{\parallel 0} \lambda)$ , где  $L$  — длина резонатора,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\beta_{\perp 0}$  и  $\beta_{\parallel 0}$  — средние значения поперечной и продольной скоростей электронов на входе в резонатор, нормированные на скорость света в вакууме. При указанных выше параметрах электронного пучка и длине резонатора гиротрона 105 мм нормированная длина пространства взаимодействия составляет  $\mu \approx 4$ , в то время как оптимальная (в смысле достижения максимальной эффективности генерации) величина этого параметра должна быть на уровне  $\mu = 15 \div 17$  (см., например, [13–15]). В частности, согласно [13], для исследуемого гиротрона так называемый поперечный КПД  $\eta_{\perp}$  (доля энергии вращательного движения частиц, преобразуемая в энергию излучения) не превышает 0,4, тогда как при  $\mu = 17$  величина  $\eta_{\perp} \approx 0,7$ .

Отметим, что при переходе на другую рабочую моду выходное вакуумное окно становится рассогласованным, что может значительно влиять на режимы работы гиротрона. С целью минимизации указанного эффекта была изготовлена согласующая пластина из нитрида бора с толщиной 3,27 мм, которая вплотную пристыковывалась к существующему вакуумному окну (см. рис. 1а). В результате коэффициент отражения на моде  $TE_{21}$  во всём диапазоне перестройки частоты не превышал 6% по мощности (см. рис. 1б).

Перед проведением экспериментов было выполнено предварительное моделирование электронно-волнового взаимодействия в гиротроне с указанными выше параметрами на основе трёх-

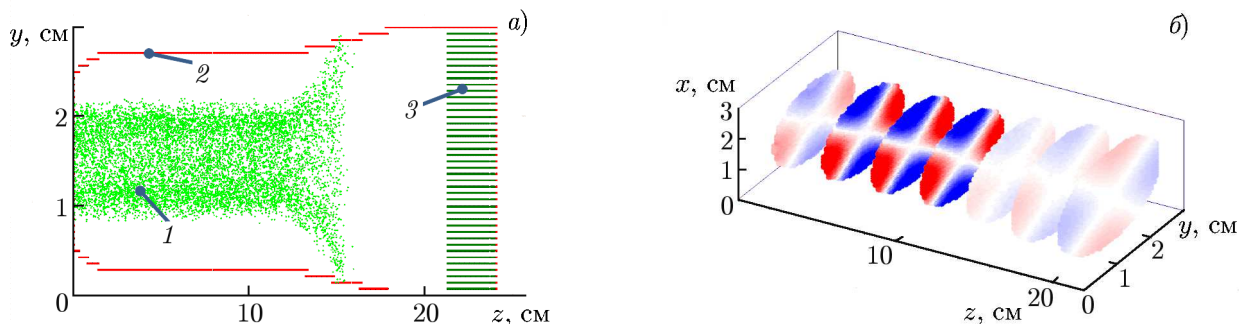


Рис. 2. (а) Геометрия пространства взаимодействия гиротрона, используемая при трёхмерном PIC-моделировании (1 — электронный пучок, 2 — резонатор, 3 — поглощающий слой); (б) полученная в моделировании пространственная структура компоненты  $B_z$  магнитного поля рабочей моды  $TE_{21}$

мерной версии PIC-кода (particle-in-cell) KARAT [16]. На рис. 2а представлена геометрия резонатора гиротрона и мгновенное положение макрочастиц. После окончания взаимодействия электроны высаживались на стенку электродинамической системы на участке спадающего магнитного поля. Согласованное выходное окно моделировалось путём введения поглощающего слоя с переменной проводимостью на коллекторном конце системы. Число ячеек в моделировании составляло  $45 \times 45 \times 442$ , число макрочастиц — порядка 25 000. В такой системе мода  $TE_{02}$  на второй гармонике гирочастоты возбуждалась при магнитных полях  $B = 0,506 \div 0,508$  Тл. При снижении магнитного поля в диапазоне  $B = 0,440 \div 0,485$  Тл возбуждалась мода  $TE_{21}$  на основном циклотронном резонансе, что подтверждается пространственной структурой продольной компоненты высокочастотного магнитного поля в пространстве взаимодействия (см. рис. 2б).

При величине начального разброса по скоростям около 20 %, соответствующей экспериментальным условиям, диапазон перестройки по частоте при возбуждении моды  $TE_{21}$  в моделировании составлял 600 МГц, т. е. около 5 % от критической частоты (см. рис. 3а). При этом в большей части полосы мощность выходного излучения превышала уровень 1 кВт, за исключением области между зонами возбуждения второй и третьей продольных мод, где имело место снижение мощности до 100 Вт. В то же время [17, 18] указанный провал, по всей видимости, может быть заметно уменьшен за счёт модификации профиля резонатора.

Дополнительное моделирование с нулевым начальным разбросом скоростей подтвердило сделанное предположение об относительно малом влиянии разброса на возбуждение продольных мод в гиротроне с коротким резонатором (в данном моделировании на возбуждение мод с  $q = 1, 2, 3$ ). Этот вывод следует из сравнения сплошной и штриховой кривых на рис. 3а в области магнитных полей  $B = 0,44 \div 0,48$  Тл. Отметим также, что при увеличении тока инжекции до 4 А расчёты предсказывают расширение диапазона перестройки частоты до величины более 10 % с возбуждением продольных мод с  $q > 3$  при сохранении высокого уровня мощности. Возможность достижения указанного значения перестройки по частоте частично подтверждается экспериментами [19], в которых наблюдалась широкая зона генерации при взаимодействии со встречной волной на моде  $TE_{21}$  при переходе на основной циклотронный резонанс. Однако теоретическое объяснение указанного эффекта в данной статье отсутствует.

В экспериментах измерение частоты генерации проводилось спектроанализатором, мощность выходного излучения регистрировалась калориметром и дополнительно контролировалась по показаниям детектора. Как видно из рис. 3б, измеренный диапазон плавной перестройки частоты при изменении магнитного поля составил 520 МГц (т. е. около 4,2 %), что близко к результатам моделирования.

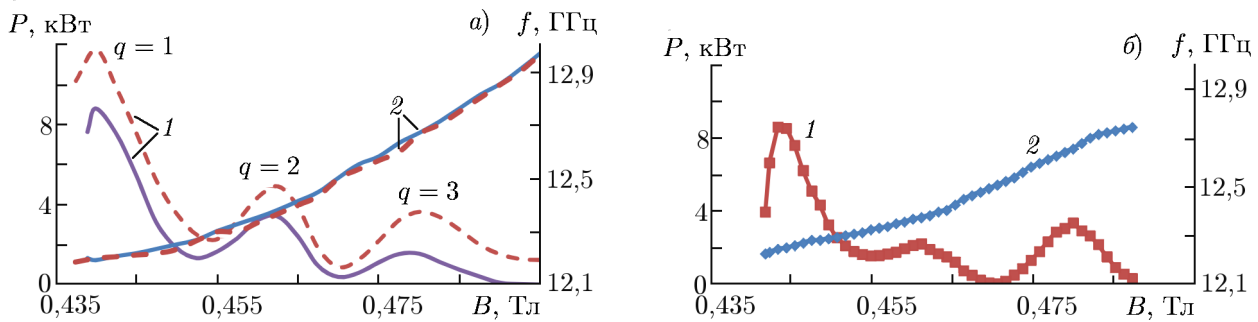


Рис. 3. Зависимость мощности  $P$  (линии 1) и частоты излучения  $f$  (линии 2) в гиротроне от магнитного поля  $B$ : (а) PIC-моделирование (штриховые линии — нулевой начальный разброс по скоростям, сплошные линии — разброс 20%,  $q$  — продольный индекс моды); (б) экспериментальные данные

Отметим, что в спектроскопических приложениях недостатком гиротрона с коротким (в нормированных единицах) резонатором является снижение стабильности частоты выходного излучения при флуктуациях параметров электронного пучка вследствие падения дифракционной добротности. При необходимости для уменьшения ширины спектра могут быть использованы дополнительные методы стабилизации рабочего напряжения и тока гиротрона, автоподстройка частоты путём управления параметрами электронного пучка [20, 21], а также пассивные методы, основанные на воздействии отражённого излучения на режим генерации гиротрона [22]. Относительно низкий КПД генерации в предлагаемой конфигурации гиротронов может быть скомпенсирован за счёт одноступенчатых или многоступенчатых схем рекуперации энергии электронного пучка. В совокупности перечисленные методы открывают путь к разработке субтерагерцовых гиротронов средней (0,1÷1,0 кВт) мощности с большой (несколько процентов) перестройкой частоты, что, в свою очередь, создаёт новые возможности для ряда современных спектроскопических приложений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 18-12-00394).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darbos C., Albajar F., Bonicelli T., et al. // J. Infrared, Millim. THz Waves. 2016. V. 37, No. 1. P. 4.
2. Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50, No. 4. Art. no. 043001.
3. Miyazaki A., Yamazaki T., Suehara T., et al. // J. Infrared, Millim. THz Waves. 2014. V. 35, No. 1. P. 91.
4. Koshelev M. A., Tsvetkov A. I., Morozkin M. V., et al. // J. Molec. Spectr. 2007. V. 331. P. 9.
5. Chang T. H., Idehara T., Ogawa I., et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105, No. 6. Art. no. 063304.
6. Torrezan A. C., Han S.-T., Mastovsky I., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, No. 6. P. 1150.
7. Barnes A. B., Nanni E. A., Hertzfeld J., et al. // J. Magn. Resonance. 2012. V. 221. P. 147.
8. Zhao J., Nusinovich G. S., Guo H., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, No. 3. P. 597.
9. Bratman V. L., Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., et al. // Int. J. Electron. 1981. V. 51, No. 4. P. 541.
10. Петелин М. И. Гиротрон. Горький: ИПФ АН СССР. 1981. С. 5.

11. Fedotov A. E., Rozental R. M., Zotova I. V., et al. // *J. Infrared, Millimeter, and THz Waves*. 2018. V. 39, No. 10. P. 975.
12. Букон Yu., Ereemeev A., Glyavin M., et al // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004. V. 32, No. 1. P. 67.
13. Нусинович Г. С., Эрм Р. Э. // *Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ*. 1972. № 8. С. 55.
14. Братман В. Л., Моисеев М. А., Петелин М. И., Эрм Р. Э. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1973. Т. 16, № 4. С. 622.
15. Gaponov A. V., Flyagin V. A., Gol'denberg A. L., et al. // *Int. J. Electron.* 1981. V. 51, No. 4. P. 277.
16. Tarakanov V. P. // *EPJ Web of Conferences*. 2017. V. 149. Art.no. 04024.
17. Torrezan A. C., Shapiro M. A., Sirigiri J. R., et al. // *IEEE Trans. Electron. Dev.* 2011. V. 58, No. 8. P. 2777.
18. Qi X.-B., Du C.-H., Pan S., et al. // *IEEE Trans. Electron. Dev.* 2017. V. 64, No. 2. P. 527.
19. Запевалов В. Е., Кораблёв Г. С., Цимринг Ш. Е. // *Радиотехника и электроника*. 1977. Т. 22, № 8. С. 1661.
20. Голубятников Г. Ю., Крушнов А. Ф., Лубяко Л. В. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32, Вып. 15. С. 13.
21. Fokin A., Glyavin M., Golubiatnikov G., et al. // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. Art. no. 4317.
22. Богдашов А. А., Глявин М. Ю., Розенталь Р. М. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44, Вып. 5. С. 87.

Поступила в редакцию 29 июня 2018 г.; принята в печать 23 ноября 2018 г.

**EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF THE POSSIBILITY  
TO EXPAND THE BAND OF SMOOTH TUNING OF GENERATION  
FREQUENCY IN SHORT-CAVITY GYROTRONS**

*M. Yu. Glyavin, A. E. Fedotov, I. V. Zotova, A. G. Luchinin, M. D. Proyavin, R. M. Rozental, and  
V. P. Tarakanov*

We show experimentally the possibility to expand significantly the band of smooth tuning of the generation frequency in gyrotrons using cavities that have shorter lengths. Due to a decrease in the sensitivity of the electron-wave interaction process to the spread in the electron beam velocities, one can increase the power of generation at higher longitudinal modes up to a level comparable with the radiation power in the case of excitation of a mode with one longitudinal variation. In this case, overlapping of generation bands at neighboring longitudinal modes is achieved by increasing the current of the electron beam. In the experiment performed in a gyrotron having an operating frequency of about 12 GHz, we demonstrated the frequency tuning band, which exceeded 4% at the kilowatt level of the output radiation power in its greater part. The obtained results open up the possibility of developing tunable high-frequency medium-power gyrotrons.