

12

## **Оптимизация условий самовозбуждения терагерцовых гиротронов на основе увеличения времени жизни циклотронных осцилляторов в рабочем пространстве с пониженным напряжением**

© Н.С. Гинзбург, М.Ю. Глявин, И.В. Зотова, И.В. Железнов,  
А.П. Фокин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: ginzburg@appl.sci-ppov.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2016 г.

Предложен метод снижения стартовых и рабочих токов коротковолновых гиротронов путем приложения тормозящего потенциала непосредственно к рабочему резонатору. Указанный эффект достигается за счет увеличения времени жизни электронов в рабочем пространстве. При заданном токе инжекции это позволяет обеспечить условия самовозбуждения при относительно низкой дифракционной добротности рабочего резонатора, что ведет к существенному снижению доли омических потерь.

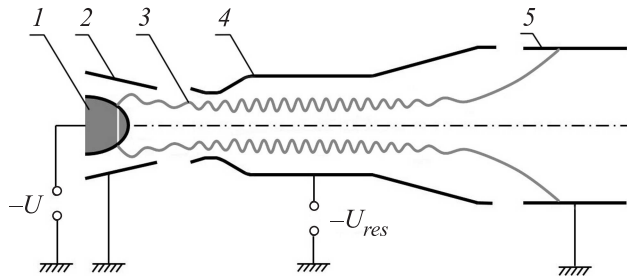
DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44187.16273

В последние годы достигнут существенный прогресс в создании гиротронов субтерагерцового и терагерцового диапазонов [1–6]. При работе на основной гармонике гирочастоты в традиционной схеме цилиндрического гиротрона [1–4], а также при работе на гармониках гирочастоты в так называемом гиротроне с большой орбитой [5,6] получено терагерцовое излучение с мощностью несколько киловатт. Вместе с тем развитие коротковолновых гиротронов сталкивается с рядом существенных проблем, среди которых можно отметить формирование сильных магнитных полей с напряженностью в 20–40 Т, формирование пучков с приемлемым разбросом параметров, а также необходимость снижения доли омических потерь, которые приводят к существенному падению выходного КПД и мощности излучения. Решение указанных

проблем может быть достигнуто путем разработки модифицированных схем гиротронов и их отдельных узлов.

Типичной проблемой, возникающей при реализации коротковолновых гиротронов (субмиллиметрового и терагерцового диапазонов), является то, что вследствие существенных ограничений на токи инжекции для выполнения стартовых условий необходимо использовать резонаторы большой длины. При возбуждении в гиротронах квазикритических мод увеличение длины резонатора приводит к быстрому росту дифракционной добротности, которая в этих условиях становится сравнимой с омической добротностью или даже превышает ее. В результате значительная доля энергии, излученной винтовым электронным потоком, поглощается в стенках резонатора. Указанные обстоятельства приводят к снижению эффективности работы гиротронов, а также к существенному разогреву стенок резонатора.

Для решения описанных выше проблем необходимо реализовать гиротрон, резонатор которого, обладая относительно низкой дифракционной добротностью, имел бы достаточную длину для выполнения стартовых условий. В данной работе предлагается схема, в которой возможность эффективного увеличения длины пространства взаимодействия гиротрона и снижения рабочих и стартовых токов обеспечивается за счет торможения электронного потока непосредственно перед влетом в рабочий резонатор, т.е. фактически за счет увеличения времени жизни частиц в пространстве взаимодействия. Предполагается, что формирование электронного потока осуществляется в стандартной магнетронно-инжекторной пушке, в которой электронный пучок приобретает начальную энергию и вращательную скорость. Далее после влета в область однородного магнитного поля происходит торможение частиц за счет отрицательного потенциала, приложенного непосредственно к рабочему резонатору. Важно подчеркнуть, что энергия вращательного движения электронов, которая в гиротронах преобразуется в энергию излучения, остается неизменной. В то же время вследствие уменьшения поступательной энергии частиц существенно возрастает время жизни электронов в пространстве взаимодействия, что и приводит к эффективному снижению стартовых токов. При заданном токе инжекции это позволяет обеспечить условия самовозбуждения при относительно низкой дифракционной добротности рабочего резонатора, что ведет к существенному снижению доли омических потерь в общем балансе энергии.



**Рис. 1.** Принципиальная схема гиротрона с увеличенным временем взаимодействия электронов с полем резонатора за счет приложения к нему тормозящего потенциала. Цифрами показаны: 1 — катод, 2 — анод, 3 — винтовой электронный пучок, 4 — рабочий резонатор, 5 — коллектор.

Принципиальная схема предлагаемой модификации гиротрона представлена на рис. 1. К резонатору, в котором происходит отбор вращательной энергии у винтового электронного пучка приложено тормозящее напряжение  $U_{res}$ . При влете электрона в резонатор поперечный импульс электронов сохраняется, но уменьшаются энергия и поступательная скорость частиц, в результате чего изменяются продольная  $v = \beta c$  и поперечная  $v_{\perp} = \beta_{\perp} c$  скорости электронов:

$$\tilde{\gamma} = 1 + \frac{e(U - U_{res})}{mc^2}, \quad \tilde{\beta}_{\perp} = \beta_{\perp 0} \frac{\gamma_0}{\tilde{\gamma}}, \quad \tilde{\beta}_{\parallel} = \sqrt{1 - \tilde{\beta}_{\perp}^2 - \tilde{\gamma}^{-2}}.$$

Здесь индекс „0“ соответствует параметрам электронов до влета в рабочий резонатор, а волнистой чертой обозначены те же величины после торможения. Соответственно электронный КПД в исследуемой схеме определяется соотношением

$$\eta = \frac{g_0^2}{1 + g_0^2} \tilde{\eta}_{\perp}(U - U_{res}, \tilde{g}, I_b),$$

где  $g_0 = \beta_{\perp 0} / \beta_{\parallel 0}$  и  $\tilde{g} = \tilde{\beta}_{\perp} / \tilde{\beta}_{\parallel}$  — питч-факторы частиц до и после торможения,  $I_b$  — ток пучка. При этом поперечный КПД  $\tilde{\eta}_{\perp} = 1 - (1/2\pi) \int_0^{2\pi} |p(\xi_{out})|^2 d\theta_0$  находится на основе решения уравнения

движения частиц для безразмерного поперечного импульса  $p$ . При взаимодействии на первой гармонике гирочастоты в приближении фиксированной структуры поля указанное уравнение движения может быть записано в виде

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} - ip(\Delta - 1 + |p|^2) = if(\xi)F.$$

Здесь использованы следующие безразмерные параметры и переменные:  $\xi = \pi \left( \tilde{\beta}_\perp^2 / \tilde{\beta}_\parallel \right) z / \lambda$  — безразмерная продольная координата,  $\Delta = 2(\omega_H^0 - \omega_c) / \omega_c \tilde{\beta}_\perp^2$  — начальная расстройка циклотронного резонанса,  $F = \left( eA / mc \omega_c \tilde{\gamma} \tilde{\beta}_\perp^3 \right) J_{m-1}(v_{m,p} R_0 / R)$  — нормированная амплитуда высокочастотного поля,  $J_n(x)$  — функция Бесселя,  $R_0$  — радиус инжекции электронного пучка,  $R$  — радиус цилиндрического волновода,  $\xi_{out} = \pi \tilde{\beta}_\perp^2 L / \tilde{\beta}_\parallel \lambda$ ,  $L$  — характерная длина пространства взаимодействия. В режиме стационарной генерации амплитуда поля  $F$  находится из уравнения баланса мощностей

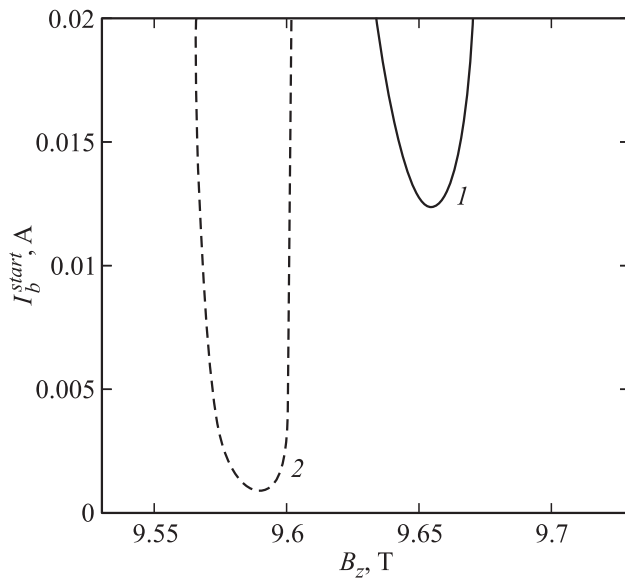
$$|F|^2 = I_0 \tilde{\eta}_\perp,$$

где

$$I_0 = 0.6 I_b (Q \cdot 10^{-4}) \frac{1}{\tilde{\gamma} \tilde{\beta}_\perp^4} \left( \frac{\lambda}{L} \right) \frac{J_{m-1}^2(v_{m,p} R_0 / R)}{(v_{m,p}^2 - m^2) J_m^2(v_{m,p})}$$

— параметр тока,  $Q$  — добротность резонатора. Стартовый ток гиротрона определяется соотношением  $I_0^{start} = 1 / \sigma_{lin}$ , где  $\sigma_{lin} = -\frac{\pi}{4} \xi_{out}^2 \left( 1 + \frac{\partial}{\partial \Delta} \right) \exp \left\{ -\frac{(\xi_{out} \Delta)^2}{8} \right\}$  — проводимость, вносимая электронным пучком в резонатор.

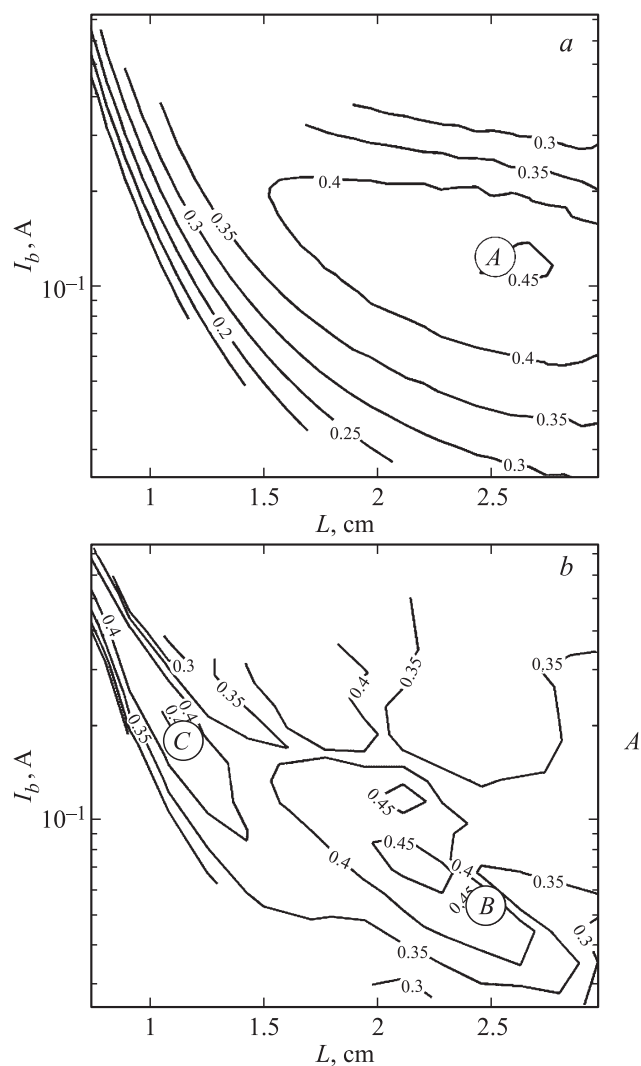
Промоделируем здесь влияние торможения электронов на параметры гиротрона с рабочей частотой 263 GHz [4], разработанного для спектроскопии и диагностики различных сред. Параметры электронного пучка в указанном гиротроне составляли: энергия электронов 15 keV, ток пучка 0.15–0.4 А, питч-фактор 1.3. Рабочая мода TE<sub>5,3</sub> возбуждалась на первой гармонике гирочастоты. Пусть тормозящее напряжение  $U_{res}$  составляет 4.5 kV. Как видно из рис. 2, при заданной длине рабочего пространства 2.5 см это позволяет на порядок снизить стартовый ток гиротрона с 0.01 до 0.001 А. Наряду со стартовым током происходит радикальное уменьшение рабочего тока, при котором



**Рис. 2.** Зависимость стартовых токов гиротрона с рабочей частотой 263 GHz [4] от величины магнитного поля в отсутствие торможения (кривая 1) и при приложении тормозящего потенциала 4.5 kV к рабочему резонатору (кривая 2).

достигается максимум электронного КПД — с 0.15 А без торможения (точка А на рис. 3, а) до 0.07 А при наличии торможения (точка В на рис. 3, б). Заметим также, что при заданной длине резонатора уменьшение поступательной скорости приводит к увеличению числа циклотронных осцилляций электрона внутри пространства взаимодействия  $N = \omega_H L / 2\pi\tilde{\beta}_{\parallel}c$  и соответственно к сужению полосы циклотронного резонанса  $\Delta\omega/\omega = 1/N$ . Это обстоятельство сокращает количество мод с различными поперечными индексами, попадающими в полосу усиления (самовозбуждения), и облегчает задачу селекции указанных мод.

Как уже отмечалось, существует альтернативная возможность — при заданном токе инжекции значительно уменьшить оптимальную длину пространства взаимодействия. Как следует из рис. 3, б, при токе 0.15 А в резонаторе с тормозящим потенциалом максимальный КПД



**Рис. 3.** Линии уровня КПД на плоскости параметров „длина рабочего резонатора–ток инжекции“ в отсутствие торможения (а) и при приложении тормозящего потенциала 4.5 кV к рабочему резонатору (b). Точки А, В и С соответствуют максимумам КПД в различных режимах работы гиротрона.

порядка 45% достигается при длине резонатора  $L = 1.2 \text{ см}$  (точка  $C$ ), примерно в два раза меньшей по сравнению со случаем, когда торможение отсутствует (рис. 3,  $a$ ). Сокращение длины резонатора и соответственно дифракционной добротности способствует уменьшению доли омических потерь.

Таким образом, изменение безразмерных параметров вследствие торможения электронов перед влетом в рабочее пространство приводит к сдвигу областей эффективного взаимодействия электронного пучка с высокочастотным полем резонатора и тем самым при сохранении электронного КПД позволяет управлять режимами генерации. В частности, показаны возможность работы со сниженными токами пучка при неизменной длине резонатора или эффективная работа при заданном токе и уменьшенной длине резонатора и соответственно сниженной дифракционной добротности.

Важно подчеркнуть, что предлагаемая схема с пониженным напряжением в рабочем пространстве фактически опирается на принципиальные особенности процесса взаимодействия в гиротронах, в которых вследствие работы на квазикритических частотах в энергию излучения трансформируется исключительно энергия вращательного движения частиц. В других типах источников (ЛБВ, ЛОВ, ЛСЭ), в которых в энергию излучения трансформируется энергия поступательного движения частиц, подобная схема не может быть использована. Естественно, что при наличии разброса электронов по питч-углам возможность практического применения предлагаемого метода в коротковолновых гиротронах ограничена условием малости числа отраженных электронов с большими начальными питч-углами. Проблема обратного тока может быть частично решена с помощью систем, перехватывающих отраженные электроны [6,7]. Тем не менее следует отметить, что исследованная схема в этом вопросе имеет значительные преимущества перед предложенной в работах [8,9] схемой отражательного гиротрона (*reflex gyrotron*), где для снижения стартового и рабочего токов предлагалось полное отражение винтового электронного потока от расположенного с коллекторной стороны тормозящего потенциала с последующим возвращением частиц в рабочее пространство.

Авторы признательны Г.Г. Денисову за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-12-00887.

**Список литературы**

- [1] *Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б.* // Гиротроны. Сб. ст. / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
- [2] *Idehara T., Tsuchiya H., Watanabe O.* // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2006. V. 27. N 3. P. 319–331.
- [3] *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. N 1. P. 015101 (1–3).
- [4] *Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2015. V. 86. N 5. P. 054705 (1–3).
- [5] *Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. N 24. P. 245101 (1–4).
- [6] *Glyavin M.Yu., Kuntsevich A.D., Manuilov V.N.* // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2015. V. 36. N 1. P. 7–12.
- [7] *Вилков М.В., Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л., Петелин М.И.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 14. С. 80–85.
- [8] *Caspi R., Jerby E.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. N 2. P. 2411.
- [9] *Goldenberg A.L., Savilov A.V., Yulpatov V.K.* // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. N 2. P. 024505 (1–4).