

13.4;01.3

Экспериментальное наблюдение хаотической генерации с шириной спектра 1.5% в гиротроне в условиях большой надкритичности

© Р.М. Розенталь, А.Э. Федотов, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.Б. Волков, С.В. Самсонов, Е.С. Семенов, А.С. Сергеев

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

Поступило в Редакцию 22 февраля 2019 г.
В окончательной редакции 1 марта 2019 г.
Принято к публикации 1 марта 2019 г.

Проведены эксперименты по наблюдению сложной динамики гиротрона в условиях большой надкритичности, соответствующей превышению токового параметра над стартовым значением в 1000–1500 раз. При токах электронных пучков, типичных для гиротронных стендов, указанное превышение реализовано за счет перехода к возбуждению низшей моды цилиндрического волновода. В диапазоне 33 GHz реализованы режимы хаотической генерации с шириной спектра до 500 MHz и рекордной относительной шириной до 1.5%, которая существенно превосходит значения, полученные в предшествующих экспериментах с приборами гиротронного типа. Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с результатами теоретического анализа на основе системы усредненных эволюционных уравнений, в которых учтена конечность времени пролета частиц через пространство взаимодействия.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.10.47755.17746

В настоящее время ведутся активные исследования генерации широкополосного шумоподобного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, которое может быть использовано в спектроскопических приложениях, системах радиовидения и радиометрии, тестирования компонентов электроники [1]. Такие источники уже реализованы на основе полупроводниковых диодов [2,3] и сверхрешеток [4], слаборелятивистских ламп обратной волны [5], лазерных систем [6] и др. Как известно, приборы гиротронного типа являются наиболее мощными источниками монохроматического излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [7]. В связи с указанными выше приложениями представляет интерес анализ работы гиротронов в условиях динамического хаоса. Однако к настоящему времени относительная ширина спектра гиротронов в подобных режимах не превышает десятых долей процента [8,9]. В то же время в [10,11] на основе динамической модели электронно-волнового взаимодействия, в которой учтена конечность времени пролета частиц через резонатор гиротрона, была продемонстрирована возможность значительного расширения полосы шумоподобного излучения в условиях, когда величина токового параметра, пропорционального току пучка и коэффициенту связи электронов с волной, существенно (на два и более порядков) превосходит стартовые значения. В настоящей работе представлены результаты первых экспериментальных исследований широкополосных режимов генерации на основе гиротрона диапазона 33 GHz, в котором достаточно большой уровень надкритичности обеспечивается за счет возбуждения низшей моды круглого волновода.

Предварительное моделирование было проведено на основе предложенной в [10] модифицированной нестационарной самосогласованной системы уравнений электронно-волнового взаимодействия в гиротронах. Модель включает неоднородное параболическое уравнение для описания эволюции амплитуды поля вблизи критической частоты волноводной моды и усредненные уравнения движения для поперечного импульса частиц. В отличие от предшествующих моделей, используемых ранее для описания сложной динамики гиротронов, в уравнениях движения была учтена временная производная $\partial/\partial\tau$, которая отвечает за конечность времени пролета электронов через пространство взаимодействия. Это позволило описать реальный наклон дисперсионной характеристики электронного пучка относительно рабочей моды и соответственно режимы одновременного сосуществования высокочастотного и низкочастотного резонансов (режим двойного пересечения указанных характеристик). В результате в условиях большой надкритичности максимальная ширина спектра генерации определяется разностью частот между низкочастотным и высокочастотным резонансами. При возбуждении моды TE_{11} круглого волновода электронно-волновое взаимодействие в гиротроне будет описываться системой уравнений

$$i \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + ia\delta(Z) = i \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\theta_0,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{g_0^2}{4} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) p + ip(\Delta - 1 + |p|^2) = ia. \quad (1)$$

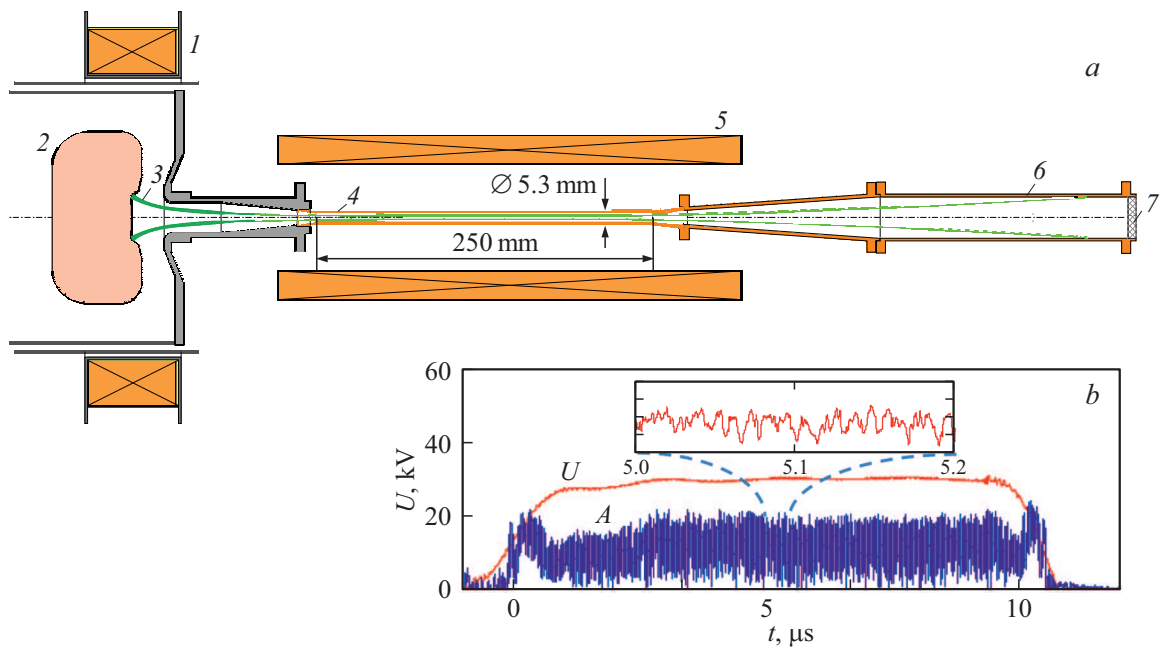


Рис. 1. *a* — схема экспериментального стенда: 1 — катодная катушка, 2 — катод, 3 — электронный пучок, 4 — резонатор гиротрона, 5 — основной соленоид, 6 — коллекторная секция, 7 — окно вывода излучения; *b* — характерная осциллограмма импульса ускоряющего напряжения (U) и сигнала с детектора (A).

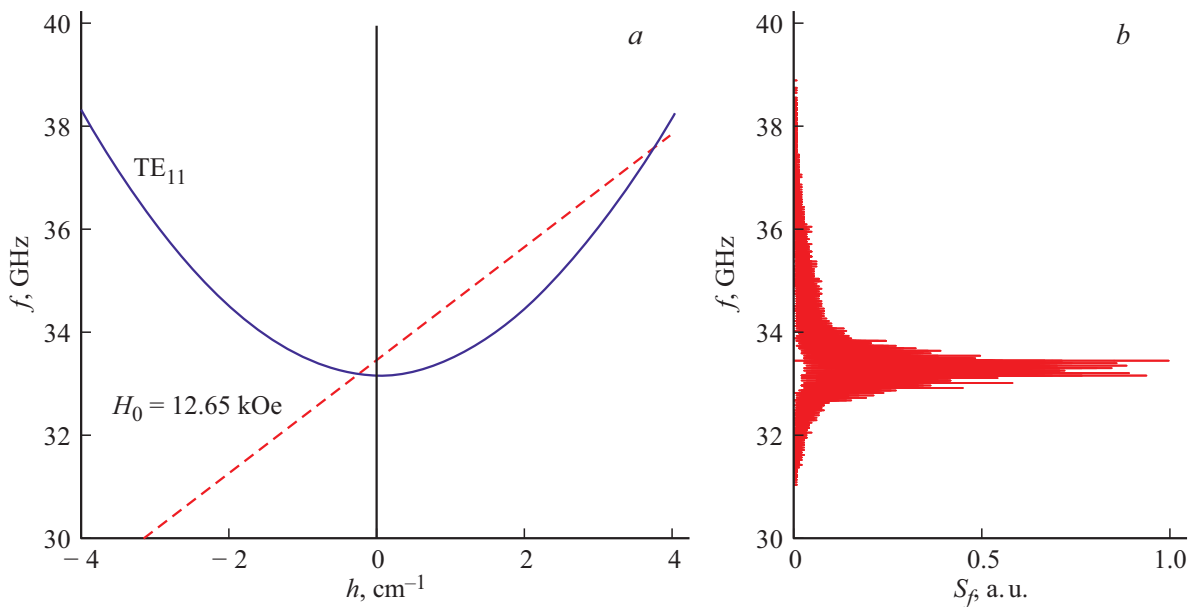


Рис. 2. *a* — дисперсионная характеристика рабочей моды TE_{11} (сплошная линия) и электронного пучка (штриховая линия); *b* — спектр выходного излучения, полученный при моделировании.

Здесь использованы следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\tau = \omega_c t \frac{\beta_{\perp 0}^4}{8\beta_{\parallel 0}^2}, \quad Z = \frac{\beta_{\perp 0}^2}{2\beta_{\parallel 0}} \frac{\omega_c}{c} z,$$

$$a = \frac{eAJ_0(\kappa r_b)}{mc\omega_c\gamma_0\beta_{\perp 0}^3}, \quad p = \frac{(p_x + ip_y)e^{-i\omega_c t}}{mV_{\perp 0}\gamma_0}$$

— нормированные время, координата, амплитуда высокочастотного поля и поперечный импульс электронов соответственно,

$$I_0 = 16 \frac{eI_b}{mc^3} \frac{\beta_{\parallel 0}}{\beta_{\perp 0}^6 \gamma_0} \frac{J_0^2(\kappa r_b)}{(v^2 - 1)J_1^2(v)} \quad (2)$$

— параметр тока (фактор возбуждения), I_b — ток трубчатого электронного пучка с радиусом инжек-

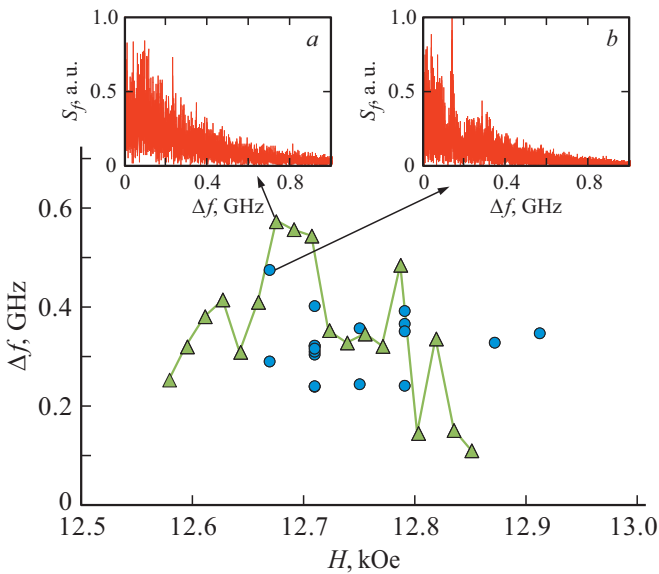


Рис. 3. Зависимость расчетной (сплошная линия) и экспериментально измеренной (кружки) ширины спектра огибающей от магнитного поля. На вставках показан спектр огибающей выходного сигнала при моделировании (а) и в эксперименте (б).

ции r_b , $\kappa = \omega_c/c$, ω_c — критическая частота рабочей моды в резонаторе гиротрона, выбранная за несущую частоту, $\nu \approx 1.84$ — первый корень уравнения $dJ_1(x)/dx = 0$, $V_{\perp 0} = \beta_{\perp 0}c$ и $V_{\parallel 0} = \beta_{\parallel 0}c$ — поперечная и продольная скорости электронов на входе в пространство взаимодействия, $g = V_{\perp 0}/V_{\parallel 0}$ — питч-фактор, $\Delta = 2(\omega_c - \omega_H^0)/\omega_c\beta_{\perp 0}^2$ — начальная расстройка циклотронного резонанса, $\omega_H^0 = eH_0/mc\gamma_0$ — невозмущенная релятивистская гирочастота электронов, направляемых магнитным полем $H = H_0z$. Функция $\delta(Z) = 8\beta_{\parallel 0}^2(\omega_c - \bar{\omega}_c(Z))/\beta_{\perp 0}^4\omega_c$ описывает профиль электродинамической системы через зависимость критической частоты от радиуса резонатора $\bar{\omega}_c(Z) = cv/r(Z)$. При записи граничных условий для уравнений движения считалось, что в сечении $Z = 0$ электроны равномерно распределены по фазам циклотронного вращения и не имеют начального разброса по поперечным скоростям: $p(Z = 0) = \exp(i\theta_0)$, $\theta_0 \in [0, 2\pi)$. На обоих концах рабочего пространства использовались излучательные граничные условия [12], что соответствует экспериментальной конфигурации.

Моделирование проводилось для параметров, близких к экспериментальным. Предполагалось, что винтовой электронный пучок с энергией 30 keV, током 0.2 A и питч-фактором 1.0 инжектируется в резонатор с длиной однородного участка 250 mm и диаметром 5.3 mm (см. схему на рис. 1, а). Выбранным физическим параметрам соответствуют значения нормированной длины резонатора $L = (\beta_{\perp 0}^2\bar{\omega}_c/2V_{\parallel 0})z \approx 19$ и параметра тока $I_0 \approx 0.15$. При этом минимальное стартовое значение указанного параметра составляет $I_{start} \approx 0.0001$ и ре-

ализуется при величине магнитного поля $H_0 \approx 12.6$ kOe, что соответствует взаимодействию на критической частоте (рис. 2, а). Моделирование показывает, что при выбранном уровне надкритичности в интервале магнитных полей $H_0 = 12.6–12.7$ kOe в системе реализуется хаотическая генерация со спектром, сосредоточенным вблизи низкочастотного резонанса. Однако шумовой пьедестал спектра заполняет весь интервал частот вплоть до высокочастотного резонанса (рис. 2, б). Полученная в результате моделирования ширина спектра составляет 1.5, 0.77 и 0.3 GHz на уровне -20 , -10 и -3 dB соответственно при средней мощности генерации порядка 10–15 W. Отстройка магнитного поля от указанных значений в силу увеличения стартового тока, сопровождающегося снижением уровня надкритичности, приводит к быстрому уменьшению ширины спектра генерации (рис. 3).

В экспериментах для формирования винтового электронного потока использовалась электронно-оптическая система с реверсом магнитного поля [13], обеспечивающая необходимую раскачку первоначально прямолинейного электронного потока, инжектируемого термоэмиссионным катодом (рис. 1, а). Длительность импульса ускоряющего напряжения составляла около 10 μ s (рис. 1, б). Диагностическая система включала в себя полупроводниковый детектор для регистрации огибающей выходного излучения, сигнал с которого записывался цифровым осциллографом с полосой 4 GHz. В интервале магнитных полей 12.9–13.5 kOe устойчиво регистрировались хаотические режимы генерации с глубиной модуляции до 100% (рис. 1, б). Наблюдаемая в эксперименте ширина спектра достигала 500 MHz (рис. 3), что хорошо согласовывалось с результатами моделирования.

Таким образом, выполненные исследования гиротрона, работающего в режиме большой надкритичности, позволили впервые экспериментально получить хаотическую генерацию с относительной шириной спектра $\sim 1.5\%$, что значительно превышает достигнутый ранее уровень. При этом, согласно расчетам, при увеличении в исследуемом гиротроне тока винтового электронного пучка до значений 1–2 A и соответствующем увеличении надкритичности до уровня 10^4 относительная ширина спектра может быть увеличена до 5–10%. Важно подчеркнуть, что в соответствии с результатами теоретического анализа [14], включающего трехмерное PIC (particle-in-cell) моделирование с использованием кода KARAT [15], при повышении напряженности рабочего магнитного поля режимы широкополосной хаотической генерации потенциально могут быть реализованы в более высокочастотных диапазонах (вплоть до 500 GHz), где такое излучение представляет безусловный интерес для спектроскопии [16].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-08-01077),

а также частично в рамках государственного задания на проведение научных исследований (тема № 0035-2019-0001).

Список литературы

- [1] Nagatsuma T, Song H.-J. // Handbook of terahertz technologies: devices and applications. CRC Press, 2015. P. 375–393.
- [2] Мясин Е.А. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 2. С. 87–94.
- [3] Ehsan N, Piepmeier J, Solly M, Macmurphy S, Lucey J, Wollack E. A robust waveguide millimeter-wave noise source // Proc. of the 45th European Microwave Conf. Paris, France, 2015. P. 853–856. DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345898
- [4] Hramov A.E., Koronovskiy A.A., Kurkin S.A., Gaifulin M., Makarov V., Maximenko V., Alexeeva N.V., Alekseev K.N., Greenaway M.T., Fromhold T.M., Patané A., Kusmartsev F.V., Moskalenko O.I., Balanov A.G. Generation of broadband chaotic signals in subterahertz range basing on semiconductor superlattice for communication systems with chaotic carriers // Int. Symp. on nonlinear theory and its applications. Kowloon, Hong Kong, China, 2015. P. 526–529.
- [5] Yefimov B.F., Kulemin G.P., Rakityansky V.A. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1999. V. 20. N 9. P. 1683–1689. DOI: 10.1023/A:1021798923390
- [6] Liu H., Li N., Zhao Q. // Appl. Opt. 2015. V. 54. N 14. P. 4380–4387. DOI: 10.1364/AO.54.004380
- [7] Booske J, Paoloni C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. N 4. P. 043001. DOI: 10.1088/1361-6463/50/4/043001
- [8] Chang T.H., Chen S.H., Barnett L.R., Chu K.R. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. N 6. P. 064802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.064802
- [9] Alberti S, Ansermet J.-Ph., Avramides A., Braunmueller F., Cuanillon P., Dubray J., Fasel D., Hogge J.-Ph., Macor A., de Rijk E., da Silva M., Tran M.Q., Tran T.M., Vuillemin Q. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. N 12. P. 123102. DOI: 10.1063/1.4769033
- [10] Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Зотова И.В., Федотов А.Э., Тараканов В.П. // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 10. С. 1555–1561.
- [11] Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Fedotov A.E., Zotova I.V., Tarakanov V.P. // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. N 3. P. 034801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.034801
- [12] Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. // Int. J. Electron. 1986. V. 61. N 6. P. 881–894. DOI: 10.1080/00207218608920927
- [13] Bratman V.L., Denisov G.G., Kalynova G.I., Manuilov V.N., Ofitserov M.M., Samsonov S.V., Volkov A.B. Broadband efficient low-relativistic gyro-TWT with helically grooved waveguide // IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. Monterey, USA, 2002. P. 359–360. DOI: 10.1109/IVELEC.2002.999422
- [14] Rozental R.M., Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Tarakanov V.P. // J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. 2019. V. 40. N 2. P. 150–157. DOI: 10.1007/s10762-018-0561-8
- [15] Tarakanov V.P. // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. P. 04024. DOI: 10.1051/epjconf/20171490
- [16] Song H.-J., Shimizu N., Furuta T., Wakatsuki A., Nagatsuma T. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. N 24. P. 241113. DOI: 10.1063/1.3039819