

02;10

## Прецизионное управление частотой гиротрона с помощью фазовой автоподстройки частоты

© Г.Ю. Голубятников, А.Ф. Крупнов, Л.В. Лубяко,  
А.Г. Лучинин, А.Б. Павельев, М.И. Петелин, A. Fernandez Curto

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: glb@applsci-nnov.ru, petelin@appl.sci-nnov.ru  
Asociación Euratom–CIEMAT para Fusión, 28040 Madrid, Spain

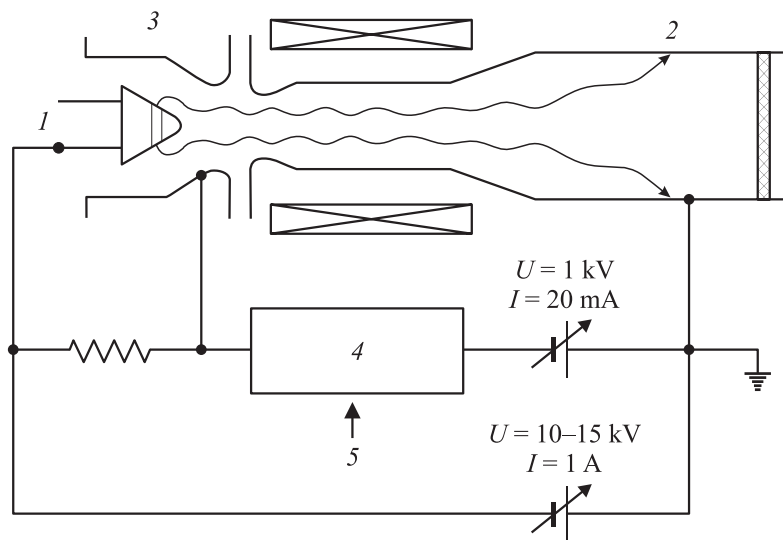
Поступило в Редакцию 16 января 2006 г.

Реализовано предложенное в [1] управление частотой гиротрона изменением напряжения на изолированном „бестоковом“ аноде. Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) гиротрона к стабилизированному внешнему маломощному генератору позволила более чем на порядок обуздать спектральную полосу генерации по сравнению с полосой свободной генерации.

PACS: 84.40.Ik

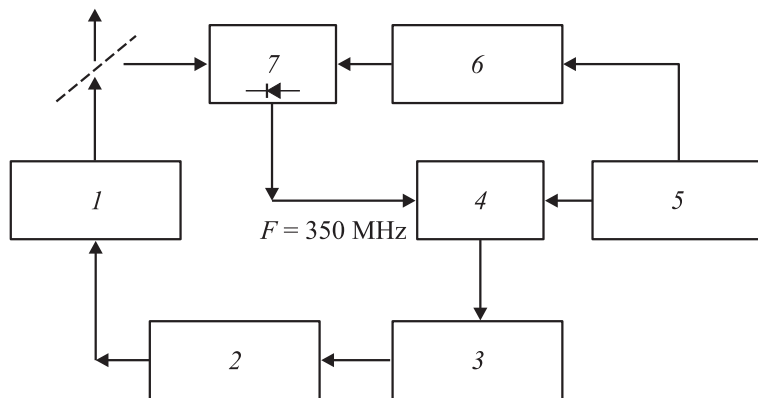
Прецизионное управление частотой излучения гиротрона в коротковолновой части миллиметрового диапазона представляет интерес для: а) молекулярной спектроскопии (гиротрон без частотной стабилизации пригоден для исследования лишь достаточно широких линий [2], частотная стабилизация открывает перспективы использования гиротронов для решения некоторых задач нелинейной спектроскопии [3,4]); б) экспериментов по обращению волнового фронта на резонансных переходах молекул в газах [5]; в) исследования спектров плазменных турбулентностей [6]; г) адаптивного подавления гидродинамических неустойчивостей в плазменных ловушках [7].

Одним из методов прецизионного управления частотой гиротрона является его подстройка, с помощью цепи обратной связи, к высокостабильному опорному генератору малой мощности. Метод фазовой стабилизации частоты гиротрона миллиметрового диапазона был продемонстрирован в работе [8], где управляющее напряжение прикладывалось к резонатору, изолированному от коллектора. Однако относительно большая емкость между коллектором и резонатором предъявляет до-



**Рис. 1.** Блок-схема управления частотой гиротрона с триодной пушкой: 1 — катод, 2 — коллектор, 3 — бестоковый анод, 4 — высоковольтный видеосуилитель, 5 — сигнал ошибки (от фазового детектора).

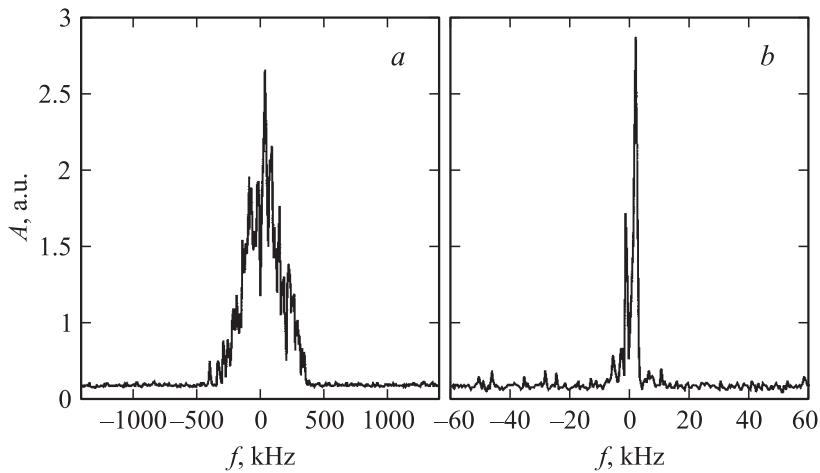
полнительные условия на оконечный каскад управляющей схемы: так, для реализации управления частотой гиротрона с диодной пушкой более чем на 1 MHz мощность выходного усилителя должна превышать несколько киловатт в полосе управления. Более экономично управлять частотой в гиротроне с триодной пушкой (рис. 1), меняя напряжение на изолированном аноде, емкость которого относительно других электродов сравнительно мала [1]. В последнем случае энергия электронов, определяемая потенциалом катода относительно резонатора, фиксирована, и изменение анодного напряжения влияет лишь на питч-фактор электронов — соотношение их вращательной и поступательной скоростей. Изменение питч-фактора сопровождается изменением как активной, так и реактивной составляющей проводимости электронного потока относительно рабочей моды резонатора, вследствие чего меняются как амплитуда, так и частота автоколебаний (последняя остается в пределах полосы, определяемой добротностью рабочей моды резонатора). Разница между частотой гиротрона и частотой опорного



**Рис. 2.** Блок-схема фазовой автоподстройки частоты гиротрона: 1 — гиротрон, 2 — высоковольтный блок питания, 3 — видеоусилитель, 4 — частотно-фазовый детектор, 5 — кварцевый генератор (5 MHz), 6 — микроволновый синтезатор (8–17 GHz), 7 — диодный смеситель.

маломощного генератора детектируется частотно-фазовым детектором (см. блок-схему рис. 2), сигнал ошибки, пропорциональный разности фаз сигналов, усиливается и подается на управляющий анод, смещая частоту гиротрона к частоте опорного сигнала. Аналогичная схема используется, в частности, для прецизионного управления частотой ламп с обратной волной [9] миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Для описываемого здесь демонстрационного эксперимента был использован гиротрон, генерировавший на основном циклотронном резонансе, непрерывное излучение с частотой 12.3 GHz и мощностью 300 W. Рабочая мода  $TF_{2,1}$  имела нагруженную добротность 400. Электронная пушка с напряжением 20 kV формировала ток около 1 A. Напряжение на изолированном аноде изменялось от 0.5 до 6 kV, рабочий ток 5–10 mA. Предельный питч-фактор было около 2. В зависимости от исходного напряжения на аноде триодной пушки (исходного питч-фактора) крутизна перестройки частоты гиротрона менялась от 1 до 10 MHz/kV, что хорошо согласуется с теоретической оценкой. Спектр свободно генерирующего гиротрона имел ширину около 400 kHz (рис. 3, а),



**Рис. 3.** Усредненные спектры излучения гиротрона: *a* — свободная генерация, *b* — использование системы ФАПЧ.

определяемую главным образом сетевыми пульсациями питающего напряжения.

В эксперименте по стабилизации частоты (рис. 2) часть мощности, ответвленной с выхода гиротрона, и сигнал опорного синтезатора частоты РЧ6-03 (8–17 GHz) подавались на диодный гармонический смеситель Ч5-13, откуда сигнал на разностной частоте 350 MHz поступал на частотно-фазовый детектор (ЧФД). Сигнал ошибки, пропорциональный разности фаз между сигналами ПЧ и гармоникой генератора, стабилизированного кварцем 5 MHz, подавался на видеоусилитель, выходной каскад которого выполнен на мощном тетраде типа ГМИ-83, имеющий коэффициент усиления около 30, в полосе управления порядка 10 kHz, что, в частности, оказалось вполне достаточным для подавления сетевых пульсаций 50 Hz (и ее гармоник) высоковольтного блока питания гиротрона.

Из приведенных на рис. 3 спектров излучения гиротрона, измеренных анализатором спектра С4-27 (выходной сигнал с которого подавался на АЦП, а затем усреднялся), видно, что спектр гиротрона, захваченного системой ФАПЧ, не превышает 10 kHz и, таким образом, более чем в 40–50 раз уже, чем в режиме свободной генерации.

Таким образом, описанный эксперимент продемонстрировал возможность стабилизации частоты и быстрого (насколько это позволяет выбранная схема управляющего видеоусилителя) прецизионного управления частотой гиротрона. При использовании гиротрона с триодной пушкой задачу удалось решить посредством системы ФАПЧ при относительно небольших затратах мощности на управление лампой. Поскольку опробованная схема управления частотой не зависит от частоты излучения гиротрона (верхняя частота ограничена смесительным диодом и составляет порядка 1 THz), то представляется перспективной для использования в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований (гранты РФФИ 05-02-17520-а, 03-02-16125-а, РФФИ-ННИО 04-02-04003-а за финансирование проекта) и С.П. Белову за ценные советы, которые помогли в проведении настоящего эксперимента.

## Список литературы

- [1] *Fernandez A., Glyavin M., Martin R.* et al. // Proc. 4<sup>th</sup> IVEC. Seoul, 2003. P. 172.
- [2] *Антаков И.И., Белов С.П., Герштейн Л.И.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19 (10). С. 634–637.
- [3] *Golubiatnikov G.Yu.* // Workshop Proceedings on „Quasi-optical control of intense microwave transmission“ (Nizhny Novgorod–2004). V. 203. Hirshfield, J.L.; Petelin, M.I. (Eds.). Springer. P. 297–304.
- [4] *Denisov G.G., Fraiman A.A., Isaev V.A.* et al. // Strong Microwaves in Plasma. Proc. of the Int. Workshop. 1993. V. 1. P. 172–186 (Ed. by A.G. Litvak. Russian Academy of Science. Institute of Applied Physics. Nizhny Novgorod, 1994).
- [5] *Suvorov E.V., Kasparek W., Lubyako L.V.* et al. // Proc of 3rd Int. Kharkov Symposium „Physics and engineering of millimeter and submillimeter waves“. V. 1. P. 188–190. Kharkov, 1998.
- [6] *Bogatov N.A., Gitlin M.S., Litvak A.G.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. P. 3635–3638.
- [7] *Petelin M., Kasparek W.* // Proc. of 6th Int. Vacuum Electronics Conf. IVEC 2005, 20–22 Apr. Noordwijk, Netherlands, ESA, WPP-246. P. 131.
- [8] *Idehara T., Mitsudo S., Ogawa I.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. V. 32. N 3. P. 910–916.
- [9] *Krupnov A.F.* // Int. J. of IR and MM Waves. 2001. V. 22. P. 1–18.