

09:10

# Управление спектром генерации гиротрона с внешними отражениями в режиме возбуждения нескольких продольных мод

© Р.М. Розенталь, Н.С. Гинзбург, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин

Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: adm@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 13 мая 2005 г.)

Исследуется возможность управления спектром многочастотной генерации в гиротроне за счет использования внешних отражений. Показано, что в автомодуляционных режимах генерации линии спектра излучения могут быть близки к резонансным частотам совокупной электродинамической системы, включающей часть выходного волновода, ограниченного отражателем. В таких условиях изменение расстояния между частотами мод, и соответственно периода автомодуляции, может быть достигнуто за счет варьирования положения отражателя. Выводы теории подтверждены результатами экспериментального исследования релятивистского гиротрона диапазона 30 GHz с внешними отражениями.

PACS: 52.80.Pi, 52.80.Yr

## Введение

Режимы периодической автомодуляции в мощных источниках СВЧ излучения могут представлять значительный интерес для ряда научных и прикладных задач [1,2]. В настоящее время наиболее эффективная генерация многочастотных сигналов мегаваттного уровня мощности, с КПД, достигающим 15–20%, получена в гиротронах с запаздывающей обратной связью, формируемой за счет введения отражений в выходном волноведущем тракте [3]. В качестве продолжений этих исследований в данной работе рассматривается возможность перестройки в таких системах периода автомодуляции за счет варьирования параметров отражателя.

В первой части статьи представлены результаты теоретического анализа электродинамических характеристик резонатора гиротрона при наличии внешних отражений и проведено численное моделирование динамики гиротрона с внешними отражениями на базе PIC-кода KARAT. Анализ проводился в рамках 2.5-мерной версии кода в предположении, что электронным потоком возбуждается низшая осесимметричная мода  $H_{01}$ . Такой подход позволил наглядно продемонстрировать основные эффекты и закономерности, при существенном сокращении трудоемкости численного моделирования возбуждения высокой несимметричной моды  $H_{53}$ , использованной в натурном эксперименте. Во второй части работы представлены результаты экспериментальных исследований релятивистского гиротрона на моду  $H_{53}$ , в котором для отражения выходного сигнала использован селективный отражатель брэгговского типа. Получены режимы одновременного возбуждения первой-второй и второй-третьей продольных мод и продемонстрированы возможности перестройки периода автомодуляции.

## 1. Численное моделирование динамики гиротрона с внешним отражателем

Исследуем влияние отражений в выходном волноведущем тракте на спектр продольных мод резонатора гиротрона на моде  $H_{01}$  с рабочей частотой 9.2 GHz, аналогичного использованному в экспериментальных исследованиях [3]. Схема резонатора гиротрона с дополнительным широкополосным отражателем в выходном волноводе представлена на рис. 1. Для сохранения добротности основного колебания близкого к оптимальному значению длина однородного участка резонатора  $L$  и внутренний диаметр отражателя были выбраны равными 70 и 42 mm соответственно.

Для исследования электродинамических характеристик резонатора гиротрона с внешним отражателем будем использовать уравнение неоднородной струны [4]

$$\frac{d^2 f}{dz^2} + h(\omega, z)^2 f = 0 \quad (1)$$

с излучательными граничными условиями

$$\left( \frac{df}{dz} \pm ihf \right) \Big|_{z=z_{\pm}} = 0,$$

поставленными в сечениях  $z_{-}$ ,  $z_{+}$  критического и выходного волноводов (рис. 1). Здесь  $f$  — нормированная амплитуда продольной составляющей магнитного

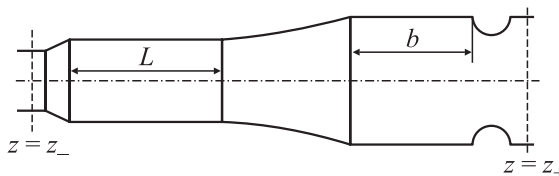
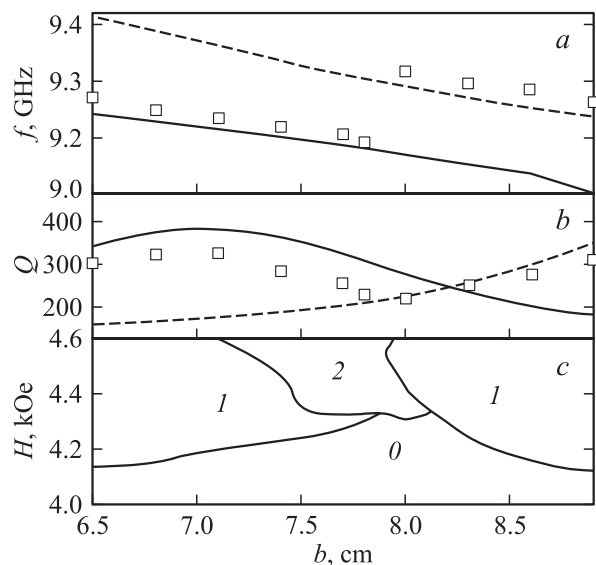


Рис. 1. Схема электродинамической системы 3 см гиротрона с широкополосным отражателем.



**Рис. 2.** Зависимости собственных частот (а) и добротностей (b) первой (сплошная линия) и второй (пунктир) продольных мод от положения отражателя ( $\square$  — результаты PIC-моделирования); (c) — расположение областей срыва колебаний (0), стационарной генерации (1) и автомодуляции (2).

поля рабочей волны,  $h(\omega, z) = \sqrt{(\omega/c)^2 - \kappa(z)^2}$  — продольное волновое число;  $\omega = \omega_0 + i\omega''$  — комплексная частота, являющаяся собственным числом задачи и определяющая частоты  $\omega_0$  и добротности  $Q = \omega_0/2\omega''$  продольных мод;  $\kappa(z) = \nu/R(z)$  — поперечное волновое число в волноводе сравнения — осесимметричной трубке с радиусом  $R(z)$ ;  $\nu$  —  $n$ -й корень уравнения  $J'_m(\nu) = 0$ ;  $m, n$  — азимутальный и радиальный индексы рабочей моды. Следует отметить, что уравнение (1) корректно в области значений радиусов, близких к радиусу однородного участка резонатора и при отсутствии переизлучений рабочей моды в моды с другими поперечными индексами. Тем не менее, как будет показано ниже, использование данного подхода позволяет с достаточной степенью точности описать основные закономерности в системе, включающей в себя часть выходного волновода с отражателем. Влияние же переизлучений для рассматриваемой системы несущественно, поскольку, учитывая аксиальную симметрию системы, рабочая мода  $H_{01}$  может рассеиваться только в моды с более высокими индексами  $H_{0n}$ , для которых выходной волновод является закритическим.

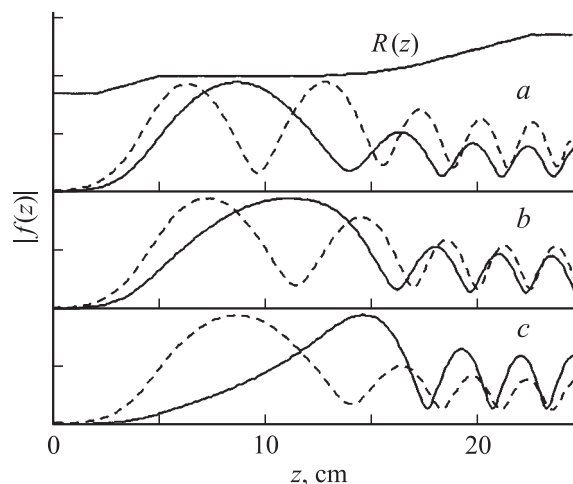
На рис. 2, а показано изменение собственных частот двух соседних продольных мод при изменении расстояния до отражателя. Видно, что увеличение расстояния до отражателя приводит к монотонному уменьшению собственных частот, при этом на расстоянии равном половине волноводной длины волны моды с двумя вариациями по продольной координате трансформируется в моду с одной продольной вариацией (рис. 3). Последняя в свою очередь вследствие уменьшения собственной

частоты до значений меньших, чем критическая частота для однородного участка резонатора, преобразуется в моду, запертую между однородным участком резонатора и отражателем. Более высокие моды с  $n$  вариациями по продольной координате трансформируются в моды с  $n-1$  вариацией. Заметим, что преобразование мод сопровождается соответствующим изменением добротности (рис. 2, b), при этом в определенной точке добротности соседних мод сравниваются.

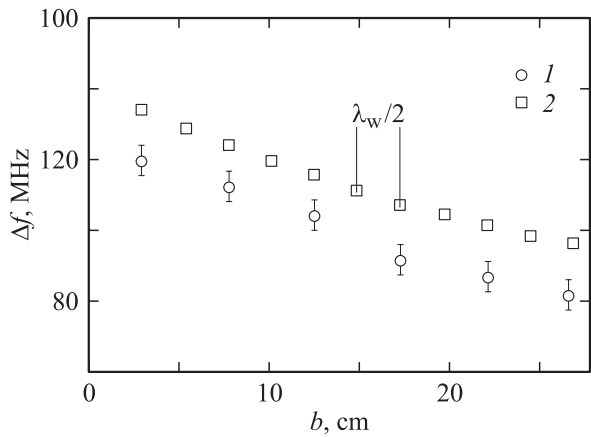
Моделирование динамики гиротрона проводилось на основе 2.5-мерной аксиально-симметричной версии PIC-кода KARAT [5]. Моде  $H_{01}$  резонатора гиротрона возбуждалась винтовым электронным пучком с начальной энергией 280 keV, током 60 А и питч-фактором 1.3. Для сокращения времени счета моделирование проводилось без задания начального разброса электронов по питч-углам. Вместе с тем введение в контрольных вариантах 15% разброса электронов по поперечным скоростям не приводило к существенному изменению характера режима генерации.

Моделирование показало, что при постоянном токе инъекции в системе могут реализовываться как режимы стационарной одночастотной генерации, так и автомодуляционные режимы. Это обстоятельство иллюстрирует рис. 2, c, где на плоскости параметров „положение отражателя — ведущее магнитное поле“ изображены области, соответствующие стационарному и автомодуляционному режимам генерации. Отметим, что КПД в стационарном режиме генерации составляет 42% (рис. 4, a). В режиме периодической автомодуляции с глубиной порядка 40% КПД порядка 25% и снижается до уровня 20% при увеличении уровня глубины модуляции до 90%.

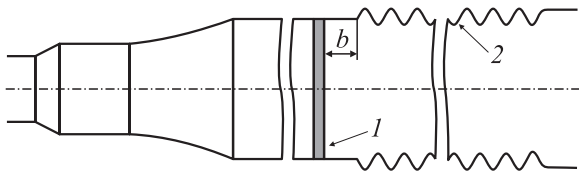
Для сравнения расчетных значений частот и добротностей рабочей моды со значениями, получаемыми в рамках PIC-моделирования, была использована следу-



**Рис. 3.** Трансформация продольной структуры первой (сплошная линия) и второй (пунктир) моды при изменении положения отражателя: а —  $b = b_0 = 6.5$  см; б —  $b = b_0 + \lambda_w/4$ ; в —  $b = b_0 + \lambda_w/2$ .



**Рис. 4.** Зависимости частоты автомодуляции (1) и расчетного межмодового расстояния (2) от положения отражателя  $b$ .



**Рис. 5.** Схема электродинамической системы гиротрона с селективным брэгговским отражателем. 1 — вакуумное диэлектрическое окно, 2 — брэгговская структура.

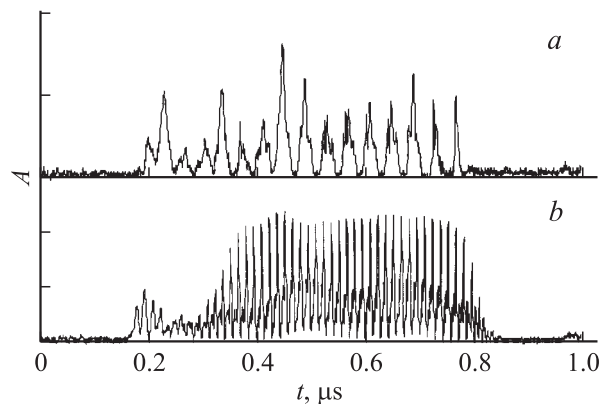
ющая процедура. После окончания переходного процесса при установлении режима стационарной генерации прекращалась инжекция пучка в систему. Далее добротность мод восстанавливалась исходя из времени затухания электромагнитных полей за счет высвечивания из резонатора. Результаты РИС-моделирования изображены точками на рис. 2,  $a, b$  и хорошо согласуются с результатами решения уравнения (1). Как следует из сопоставления рисунков 2,  $b$  и 2,  $c$ , область возникновения автомодуляционных режимов генерации соответствует положению отражателя, где добротности соседних мод близки между собой, при этом частота автомодуляции близка к разности частот генерации продольных мод.

В такой ситуации, очевидно, существует возможность управления частотой и соответственно периодом автомодуляции путем изменения частотного интервала между модами. Это легко достигается путем варьирования расстояния до отражателя  $b$ . На рис. 5 представлена зависимость расчетного межмодового расстояния от положения отражателя и полученные в результате моделирования частоты автомодуляции. Видно, что при изменении  $b$  от 5 до 27 см частота автомодуляции уменьшается с 120 до 81 МГц, что хорошо согласуется с расчетным изменением межмодового расстояния со 135 до 98 МГц.

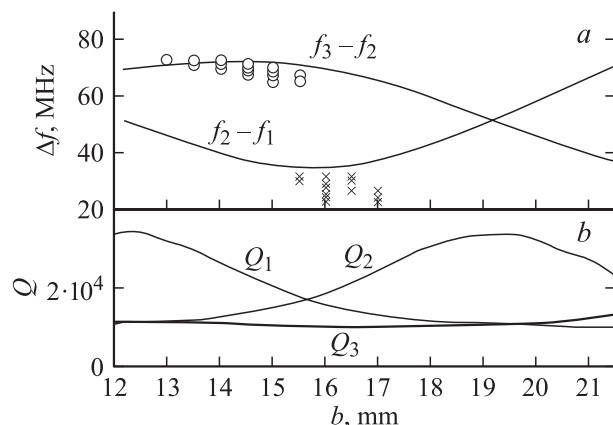
## 2. Экспериментальное исследование гиротрона с внешним отражателем

Экспериментальные исследования динамики гиротрона с внешними отражениями были выполнены на основе релятивистского гиротрона на моде  $H_{53}$  [6] на базе ускорителя „САТУРН“ [7]. Схема использованной в эксперименте электродинамической системы приведена на рис. 5. Для предотвращения переизлучений выходного сигнала в паразитные моды для частичного отражения выходного сигнала использовался селективный рефлектор брэгговского типа, настроенный на частоту генерации гиротрона 29.92 ГГц. Амплитуда гофрировки, ее период и длина брэгговской структуры отражателя были равны 1.0, 7.1 и 215 мм соответственно, при этом расчетный максимум коэффициента отражения по мощности составлял 63%. Положение рефлектора, расположенного за пределами вакуумного объема на расстоянии  $b$  от выходного диэлектрического окна, изменялось в пределах половины волноводной длины волны  $\lambda_w/2 \approx 7.1$  мм с помощью набора вставок с шагом 0.5 мм. С целью снижения вероятности развития СВЧ пробоя энергия пучка была снижена до 200 кэВ при сохранении тока инжекции на уровне 55–65 А.

В эксперименте были зарегистрированы два существенно различных диапазона частот автомодуляции — 23.2–31.8 и 65.9–73.2 МГц (рис. 6), которые далее для краткости будем обозначать режимами НЧ- и ВЧ-модуляции. Сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями межмодового расстояния и добротностей продольных мод (рис. 7) позволили сделать вывод, что НЧ-модуляция соответствовала режиму одновременного возбуждения первой и второй, а ВЧ-модуляция — второй и третьей продольных мод. Важно отметить, что режим возбуждения соседних мод в соответствии с результатами моделирования наблюдался только в условиях близости добротностей соответствующих мод.



**Рис. 6.** Осциллограммы СВЧ импульсов в режиме НЧ автомодуляции при  $b = 16$  мм,  $H_0 = 14.15$  кОе (а); в режиме ВЧ автомодуляции при  $b = 15$  мм,  $H_0 = 14.5$  кОе (б).



**Рис. 7.** Расчетные зависимости разности частот между продольными модами (*a*) и добротностей мод (*b*) от положения отражателя.  $\times$  — частоты НЧ,  $o$  — ВЧ автомодуляции.

Средняя мощность генерации в режиме НЧ- и ВЧ-модуляции достигала соответственно 400 и 200 kW с КПД не превышающим 3%. Столь низкие значения эффективности, очевидно, связаны с неоптимальными параметрами системы: длиной однородного участка резонатора с током инжекции. Возможности уменьшения тока пучка ограничивались ухудшением качества пучка, связанным с уменьшением температуры катода, и, как следствие, нарушением однородности и стабильности эмиссии. Вместе с тем при сниженных до 15–20 А токах инжекции в отдельных импульсах был зарегистрирован КПД до 8%.

Для проверки возможности управления частотой автомодуляции отражатель с помощью дополнительной вставки был удален на расстояние порядка 20 см. В соответствии с расчетами расстояние между первой и второй и третьей продольными модами в этом случае должно уменьшиться на 4 и 7 MHz соответственно. Экспериментально наблюдаемый в этой конфигурации диапазон частот для НЧ-модуляции составил 25.6–30.5 MHz, для ВЧ-модуляции — 61–65 MHz. В совокупности эти данные демонстрируют возможность управления частотой автомодуляции путем изменения положения отражателя.

## Заключение

В работе теоретически проанализировано влияние внешних отражений на электродинамические характеристики резонатора гиротрона. Показано, что в условиях достаточно сильных отражений в зависимости от положения отражателя добротности соседних продольных мод могут сравниваться. В рамках PIC-моделирования показано, что такая ситуация благоприятна для развития автомодуляционной неустойчивости, связанной с одновременным возбуждением нескольких продольных мод. При этом период автомодуляции, определяемый межмодовым расстоянием, можно регулировать путем

изменения положения отражателя. Экспериментально возможность подобной перестройки частоты автомодуляции продемонстрирована в релятивистском гиротроне диапазона 30 GHz с селективным брэгговским отражателем.

Авторы выражают признательность Н.А. Завольскому, В.Е. Запелову и М.А. Моисееву за стимулирующие дискуссии в процессе работы.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты № 03-02-17560, 03-02-16650), ИНТАС проект № 03-55-1858.

## Список литературы

- [1] *Ostashev V.E., Clifford S.F., Lataitis R., et al.* // Acta Acustica. 2001. Vol. 87. N 6. P. 717–720.
- [2] *Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М.* Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М.: Радиотехника, 2003.
- [3] *Rozental R.M., Zaitsev N.I., Ilyakov E.V., et al.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2004. V. 32. N 2. P. 418–421.
- [4] *Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12. № 8. С. 1236–1244.
- [5] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkeley Res. Assoc., 1992.
- [6] *Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запелов В.Е. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 10. С. 914–918.
- [7] *Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С. и др.* // ПТЭ. 1995. № 3. С. 138–145.