

01;09

Использование отражения с запаздыванием для получения автомодуляционных и стохастических режимов генерации в гиротронах миллиметрового диапазона

© Н.С. Гинзбург, М.Ю. Глявин, Н.А. Завольский, В.Е. Запечалов,
М.А. Моисеев, Ю.В. Новожилова

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 9 января 1997 г.

Показано, что введение локального сужения волноводного тракта на расстоянии, сравнимом с длиной пространства взаимодействия, на порядок снижает значение тока инжекции, при котором в гиротронах реализуются стохастические режимы генерации. Это открывает благоприятные перспективы для экспериментального наблюдения подобных режимов.

В настоящее время гиротроны являются наиболее мощными источниками квазинепрерывного когерентного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн [1,2]. В гиротронах мегаваттного уровня мощности ширина линии излучения составляет порядка 10 MHz. Вместе с тем для ряда приложений — физических, радиотехнических, локационных, технологических — представляет значительный интерес мощное шумовое микроволновое излучение с шириной полосы, достигающей нескольких гигагерц. Например, использование подобного излучения в технологических установках по спеканию керамики может обеспечить более однородное прогревание образца по сравнению с одночастотным излучением. В связи с этим представляется актуальным исследование возможности генерации мощного широкополосного излучения в гиротронах.

Проведенные ранее исследования нелинейной динамики гиротронов с нефиксированной продольной структурой поля [3,4] показали принципиальную возможность реализации стохастических режимов генерации. С ростом превышения тока над стартовым значением стационарный

режим генерации сменяется режимом с периодически меняющейся во времени амплитудой. Дальнейшее увеличение превышения над порогом генерации ведет к получению стохастических режимов. Однако при традиционной конфигурации пространства взаимодействия в виде отрезка слабонерегулярного волновода, максимально согласованного с выходными трактами, бифуркационные значения токов примерно на порядок превосходят рабочие токи, что затрудняет наблюдение подобных режимов на существующих гиротропных стендах. Проблема осложняется также тем, что в используемых в современных гиротронах сверхразмерных резонаторах увеличение тока может приводить к возбуждению паразитных мод с поперечной структурой поля, отличной от структуры рабочей моды.

В настоящей работе исследована возможность снижения бифуркационных значений тока, при которых происходит переход к автомодуляционным и стохастическим режимам генерации в гиротронах, путем введения дополнительных отражений с запаздыванием на коллекторном конце пространства взаимодействия. Предполагается, что частичное отражение излучения происходит от небольшой нерегулярности выходного волноводного тракта — локального сужения, расположенного на определенном расстоянии от конца пространства взаимодействия. В такой системе излученный сигнал с запаздыванием вновь оказывает воздействие на электронный пучок. По аналогии с другими типами генераторов с запаздывающей обратной связью, в частности с резонансными ЛБВ [5], в подобной модели гиротрона можно ожидать снижения порога возникновения автомодуляционных и стохастических режимов.

Рассмотрим модель гиротрона с низкодобротным резонатором, возбуждаемым трубчатым аксиально-симметричным электронным пучком на частоте, близкой к частоте отсечки. Резонатор представляет собой отрезок круглого слабонерегулярного волновода, радиус которого может плавно меняться вдоль оси. С катодного конца пространство взаимодействия ограничивается закритическим сужением. Взаимодействие электронов с высокочастотным полем начинается в сечении $z = 0$ и заканчивается в сечении $z = l_1$. Частичное отражение излучения происходит от перетяжки, расположенной в области $l_2 < z < l_3$ (рис. 1).

Предположим, что поле в резонаторе представляет собой моду с заданной поперечной структурой $\mathbf{E} = \text{Re}\{A(z, t)\mathbf{E}_s(\mathbf{R}_\perp)\exp(i\bar{\omega}_0 t)\}$, и амплитуда поля меняется во времени достаточно медленно $|\frac{\partial A}{\partial t}| \ll \bar{\omega}_0|A|$. Тогда для описания процесса электронно-волнового взаимодействия

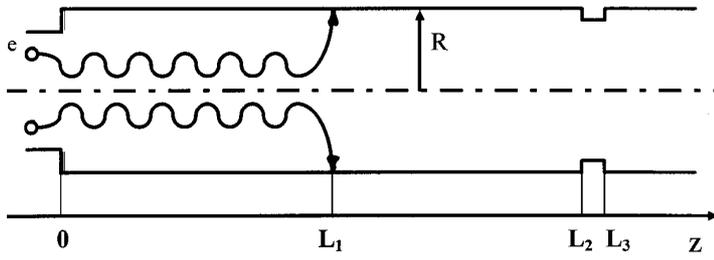


Рис. 1. Модель гиротрона с запаздывающей обратной связью.

могут быть использованы следующие уравнения [3]:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \zeta^2} - i \frac{\partial f}{\partial \tau} + \delta f = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\vartheta_0, \quad (1)$$

$$\frac{dp}{d\zeta} + i(\Delta + |p|^2 - 1)p = if. \quad (2)$$

Здесь $f = (eA/mc\gamma_0) \cdot J_{m-1}(\bar{\omega}_0 R_0/c)$ — безразмерная амплитуда высокочастотного поля; J_{m-1} — функция Бесселя, описывающая поперечную структуру электрического поля $TE_{m,p}$ моды; $\zeta = (\beta_{\perp 0}^2/2\beta_{\parallel 0}) \cdot (\omega_{H0}z/c)$ — безразмерная продольная координата; комплексная величина $p = (p_{\perp}/p_{\perp 0}) \exp(i\vartheta)$ характеризует орбитальный импульс электронов; $\beta_{\perp, \parallel 0} = (v_{\perp, \parallel 0}/c)$ — начальные значения поперечной и продольной компонент скорости электронов; γ_0 — начальные значения Лоренц-фактора электронов; R_0 — радиус электронного пучка; $\tau = (\beta_{\perp 0}^4/8\beta_{\parallel 0}^2)\omega_0 t$ — безразмерное время; ω_{H0} — начальное значение гирочастоты; ω_0 — критическая частота в текущем сечении резонатора; $\delta = (8\beta_{\parallel 0}^2/\beta_{\perp 0}^4) \cdot (1 - \omega_0/\bar{\omega}_0)$ — функция, характеризующая неоднородность профиля поперечного сечения резонатора;

$$I_0 = 16 \frac{e|I|}{mc^3} \cdot \frac{\beta_{\parallel 0} \beta_{\perp 0}^{-6}}{\gamma_0} \cdot \frac{J_m^2(\bar{\omega}_0 R_0/c)}{(\nu^2 - m^2) J_m^2(\nu)}$$

— параметр тока; ν — p -й корень уравнения $J'_m(\nu) = 0$, $\Delta = (2/\beta_{\perp 0}^2) \cdot (\bar{\omega}_0 - \omega_{H0})/\bar{\omega}_0$ — отстройка циклотронной частоты от критической частоты $\bar{\omega}_0$ в выходном сечении.

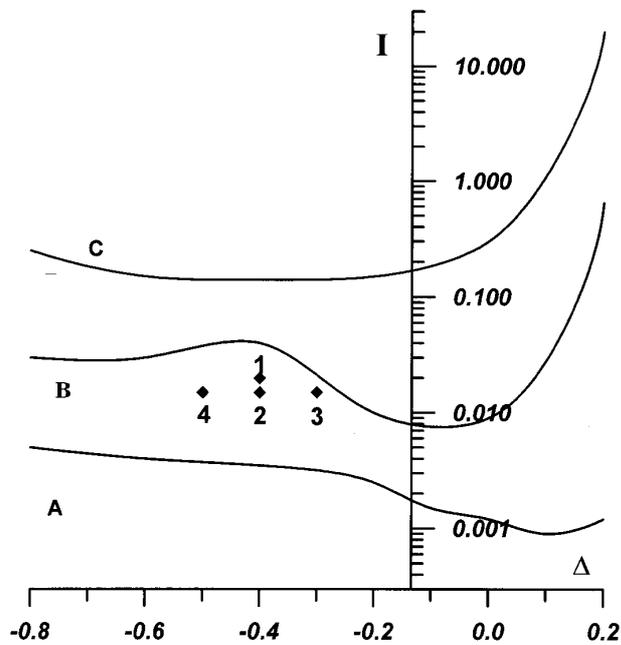


Рис. 2. Области различных режимов генерации на плоскости параметров I и Δ для гиротронов без запаздывающей обратной связи.

Электроны на входе равномерно распределены по фазам цилотронного вращения: $p(\zeta = 0) = \exp(i\vartheta_0)$, $\vartheta_0 \in (0, 2\pi)$. Начальное условие для поля имеет вид: $f(\tau = 0) = f_0(\zeta)$. Граничное условие для поля во входном закритическом сечении $f(\zeta = 0) = 0$. В выходном сечении использовалось так называемое безотражательное граничное условие [3]:

$$f(\zeta_{out}, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial f(\zeta, \tau')}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta_{out}} \cdot d\tau' = 0. \quad (3)$$

При численном моделировании уравнений (1), (2) условие излучения (3) задавалось в выходном сечении $z = l_3$. При этом после обрыва электронно-волнового взаимодействия, в области $l_1 < z < l_2$,

с помощью уравнения (1) с нулевой правой частью моделировалось только распространение излучения. Наличие перетяжки учитывалось в уравнении (1) с помощью функции $\delta(z)$. На рис. 2 приведено разбиение области параметров I, Δ для однородной модели гиротрона с безразмерной длиной $\zeta_{out} = 15$. Область стационарной генерации лежит между кривыми A и B , режим периодической автомодуляции — между кривыми B и C , стохастического режима генерации — выше кривой C . Оптимальной для получения автомодуляционных и стохастических режимов является область отрицательных расстроек $\Delta < 0$, где электронный пучок находится в основном в синхронизме с распространяющейся навстречу компонентой электромагнитного поля резонатора, обеспечивающей внутреннюю распределенную обратную связь. При продвижении в область нулевых и положительных расстроек $\Delta \geq 0$, где синхронной электронному пучку становится попутная компонента поля, влияние встречной волны и связанного с ней механизма обратной связи ослабляется и начинает доминировать другой механизм, обусловленный отражением от скачка электронной проводимости в выходном сечении пространства взаимодействия.

На основании проведенных расчетов оценим возможность наблюдения автомодуляции в гиротроне с однородным по длине профилем резонатора для рабочих мод $TE_{11,3}$ и $TE_{15,4}$ с частотами 83 и 110 GHz соответственно. Пусть резонатор представляет собой отрезок гладкого волновода длиной около 10λ ,¹ где λ — длина волны в свободном пространстве. Резонатор возбуждается электронным пучком с током 25 А, энергией чатиц 70 keV и начальным питч-фактором 1.3. Указанным физическим параметрам соответствуют безразмерная длина $\zeta_{out} = 15$ и значения параметра тока $I = 0.01$ для моды $TE_{15,4}$ и $I = 0.016$ для моды $TE_{11,3}$. Как видно из рис. 2, в гиротроне с такими параметрами реализуется стационарный режим генерации.

Рассмотрим теперь гиротрон с теми же характеристиками области взаимодействия, в который введена запаздывающая обратная связь, создаваемая перетяжкой (рис. 1) с глубиной $0.01 \div 0.02R$, где R — радиус волновода. Такая перетяжка дает отражение по мощности около 20%. Перетяжка расположена на расстоянии $\zeta_2 - \zeta_1 = 15 \div 25$, сравнимом с длиной пространства взаимодействия. На рис. 3 и в таблице приведены результаты численного моделирования предлагаемой конфи-

¹ Эта длина обычно ограничена размерами сверхпроводящего соленоида

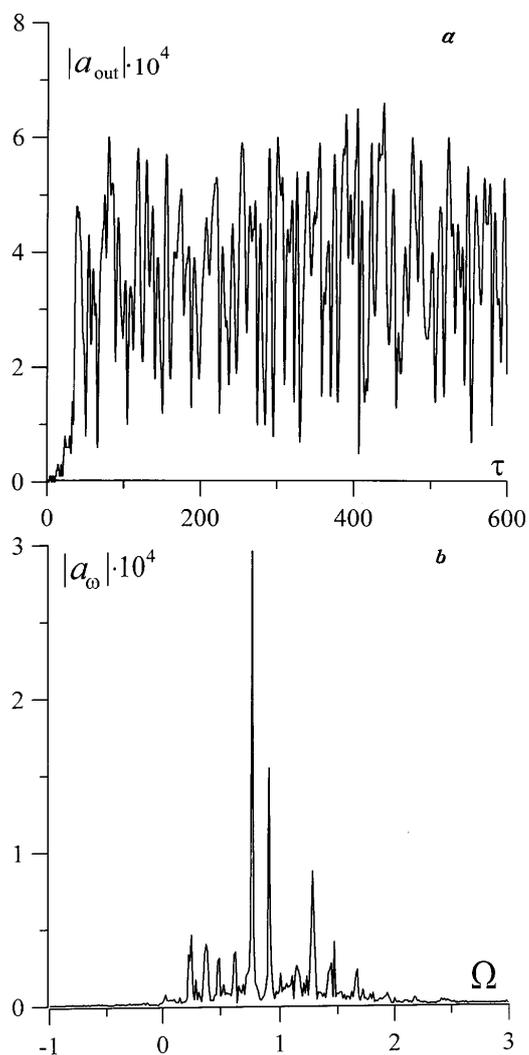


Рис. 3. Временная зависимость выходной амплитуды сигнала (*a*) и спектр сигнала (*b*) в гиротроне с запаздывающей обратной связью при $I = 0.015$, $\Delta = -0.5$, глубине перетяжки $0.02R$, $\zeta_1 = 20$, $\zeta_2 = 40$, $\zeta_2 - \zeta_1 = 2$.

№ п/п	ζ_1	ζ_2	ζ_3	Глубина перетяжки	I	Δ	Режим
1	15	35	37	0.01R	0.02	-0.4	Стохастика
2	15	40	42	0.01R	0.015	-0.4	”
3	15	40	42	0.01R	0.015	-0.03	Глубокая автомодуляция
4	20	40	42	0.02R	0.015	-0.5	Стохастика

гиротрона. Соответствующие таблице параметры гиротронов отмечены точками 1–4 на рис. 2 и лежат в зоне стационарных режимов для однородной модели. Введение запаздывающей обратной связи почти на порядок снижает бифуркационные значения токов и обеспечивает реализацию стохастических режимов генерации при отмеченных рабочих параметрах гиротронов. На рис. 3 показана характерные временные зависимости амплитуды выходного сигнала, а также спектр в стохастическом режиме генерации. Здесь $\Omega = (\omega - \bar{\omega}_0)/\bar{\omega}_0$ — относительная ширина спектра, достигающая в подобном режиме 3%. Важно также подчеркнуть, что при небольших отрицательных расстройках $\Delta < 0$ система не критична к местоположению перетяжки, т. е. при изменении местоположения l_2 в пределах длины волны λ характер процесса генерации не меняется.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что при введении запаздывающей обратной связи бифуркационные значения токов становятся соизмеримыми с рабочими токами существующих гиротронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 97–02–17061.

Список литературы

- [1] *Fix A.Sh., Flyagin V.A., Goldenberg A.L. et al. // Int. Electronics. 1984. V. 57. P. 897.*
- [2] *Гольденберг А.Л., Денисов Г.Г., Запелалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. С. 635.*
- [3] *Гинзбург Н.С., Завольский Н.А., Нусинович Г.С. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 5. С. 1031.*
- [4] *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. // Int. J. Electronics. 1986. V. 61. P. 881.*
- [5] *Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 24. С. 1118.*