

УДК 621.385.69

## ГИРОТРОНЫ С ЭШЕЛЕТТНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

*С. Н. Власов, Е. В. Копосова, А. Б. Павельев, В. И. Хижняк*

Рассматриваются гиротроны с эшелеттными резонаторами, образованными дифракционными решётками на внутренних стенках конической поверхности со штрихами, перпендикулярными оси конуса. Выбором параметров решётки обеспечивается управление добротностью рабочей моды резонатора. Селективные свойства резонатора определяются зависимостью от частоты коэффициента отражения от решётки в антизеркальном направлении. Такие резонаторы имеют при высокой селекции существенно более эффективную связь с выходным трактом, чем цилиндрические, что даёт возможность увеличения мощности гиротронов. В силу высокой селективности эшелеттных резонаторов, их можно использовать в гиротронах на гармониках гирочастоты, не опасаясь возбуждения низших гармоник. Определяются пусковые токи и эффективность гиротрона с эшелеттным резонатором. Проведенные экспериментальные исследования гиротронов с эшелеттными резонаторами подтвердили возможность существенного разрежения спектра генерации гиротрона.

Традиционно в гиротронах используются резонаторы в виде труб с переменным сечением. Для увеличения мощности гиротрона необходимо увеличивать диаметр поперечного сечения резонатора, что приводит к сгущению спектра колебаний и препятствует получению колебаний с регулярной пространственно-временной структурой. Селекция колебаний в гиротронах затрудняется тем, что рабочие моды гиротронов имеют минимальную дифракционную добротность [1]

$$Q_{\min} \approx 4\pi L^2/\lambda^2 = k^2 L^2/\pi, \quad (1)$$

( $L$  — длина резонатора,  $\lambda$  — длина волны,  $k = 2\pi/\lambda$ ), а добротность паразитных мод должна быть ниже. В настоящей работе обсуждаются гиротроны с эшелеттными резонаторами, причём последние имеют при высокой селекции существенно более низкую, чем (1), добротность рабочей моды.

Эшелеттные резонаторы образованы дифракционными решётками на внутренних стенках конической поверхности со штрихами, перпендикулярными оси конуса (рис. 1). Параметры решётки подбираются так, чтобы падающая на неё волна рассеивалась в двух направлениях: обратном (для организации рабочей моды) и зеркальном (для вывода излучения из резонатора). Отношение энергий между обратным и зеркальным лучом определяется амплитудой гофра при выбранной его форме [2–4], чем обеспечивается управление добротностью рабочей моды резонатора. Класс

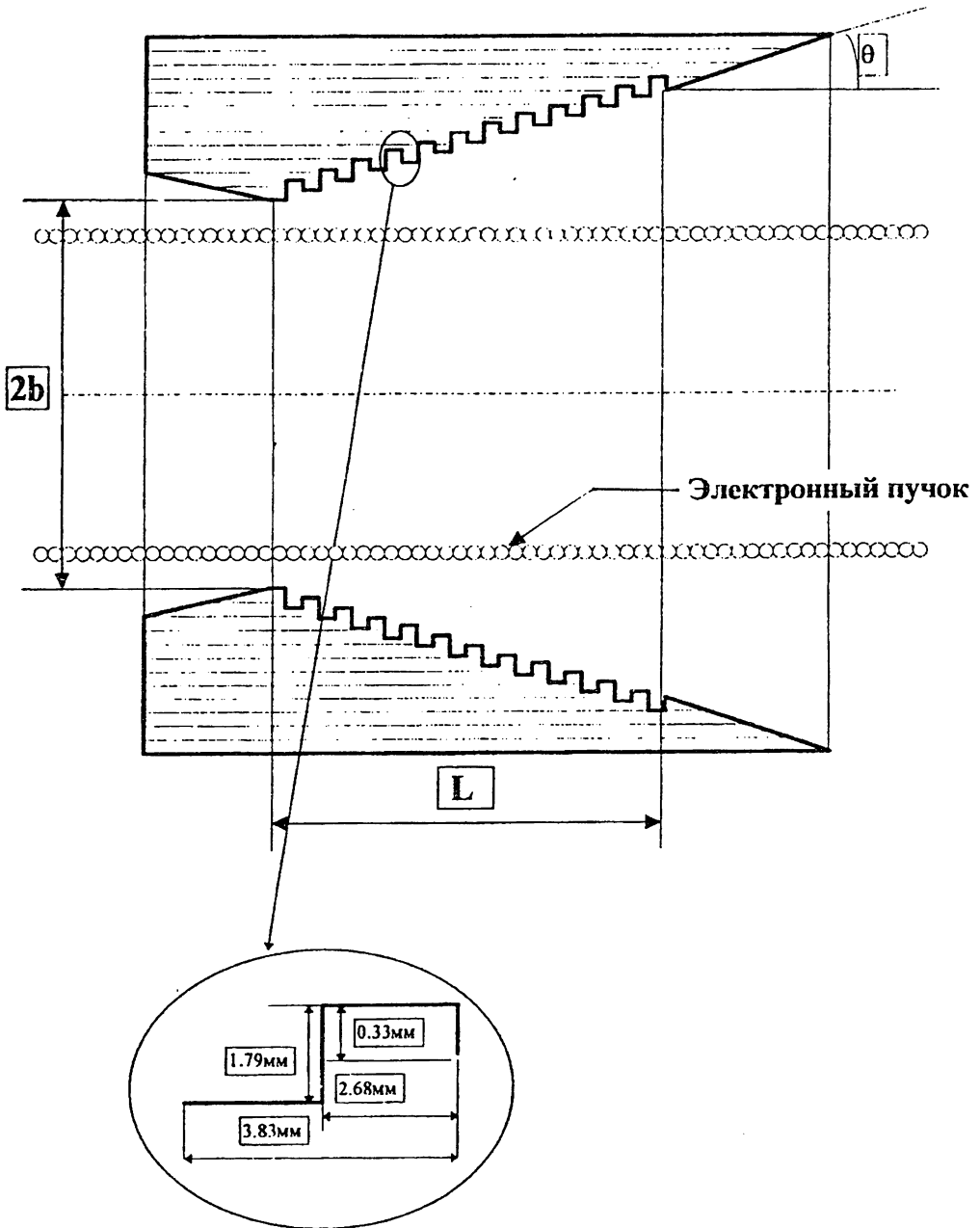


Рис. 1. Аксиально-симметричный резонатор с эшелеттом в качестве боковой стенки.

форм гофра, при которых имеет место достаточно полное отражение падающего излучения в обратном направлении, очень широк. Форма, выбранная нами (вставка, рис. 1), является одной из простейших в изготовлении.

Селективные свойства резонатора определяются зависимостью коэффициента отражения  $R(\omega)$  в обратном направлении от частоты [2-4], близкого к единице только на рабочей частоте  $\omega_0$ , и появлением угла перекоса [2]

$$\gamma \simeq 0,5\xi(\omega - \omega_0)/\omega_0$$

между падающим и отраженным лучом на нерабочих частотах  $\omega$ .<sup>\*</sup> Расчёт аксиально симметричных резонаторов эшелетного типа проводится в квазиоптическом приближении [5-7], используя результаты численного анализа задачи дифракции плоской волны на идеально проводящих решётках, полагая радиус  $b$  — расстояние от оси до вершины ближайшего зубца эшелетной поверхности — и длину  $L$  резонатора существенно превосходящими длину волны  $\lambda$  и период гофра  $d$ .

В таком резонаторе имеются моды с продольной составляющей магнитного поля ( $H$ -моды) и с продольной составляющей электрического поля ( $E$ -моды). В гиротронах используются  $H$ -моды. Их собственные частоты определяются из выражения

$$\ln |D| + i \arg D + \ln |R(\omega)| + i \arg R(\omega) - i\Phi = 2i\pi p, \quad (2)$$

где  $p \gg 1$  — радиальный индекс моды,  $D$  — собственное значение интегрального уравнения [6]:

$$D\Psi(z_2) = \sqrt{\frac{ik}{4\pi b_m}} \int_{-L/2}^{L/2} \exp[-ik(z_1 - z_2)^2/(4b_m) - i\gamma k z_1] \Psi(z_1) dz_1, \quad (3)$$

$$R(\omega) = |R_0(\omega)R_{0hm}|e^{i(k\gamma z + \Phi)}, \quad (4)$$

где  $R_0(\omega)$  — коэффициент отражения в обратном направлении от плоской решётки с тем же профилем гофра,  $R_{0hm}$  — омический коэффициент отражения от решётки, который по порядку величины равен омическому коэффициенту отражения от гладкой поверхности,  $\Phi$  — фаза коэффициента отражения от эшелетной поверхности относительно ближайшей к оси точке зубца,  $b_m = (b + L \operatorname{tg} \theta / 2) \sqrt{1 - m^2 / (kb)^2}$ ,  $m$  — азимутальный индекс моды. Множитель  $e^{i\gamma k z}$  введен для учёта угловой дисперсии эшелетта.

Применяя асимптотику Дебая для цилиндрических функций и ограничиваясь первым членом, получим выражение для действительной  $k'$  и

<sup>\*</sup>В антенной технике параметр  $\xi$  часто называется углочастотной чувствительностью.

мнимой  $k''$  частей волнового числа собственных колебаний:

$$k' = \frac{1}{b_m} \left\{ \pi (m/2 + p - 3/4) - m^2/2\pi (m/2 + p - 3/4) + \delta \right\}, \quad (5a)$$

$$\delta = \frac{1}{2} [\arg R + \arg D],$$

$$k'' \approx - \{ \ln |D| + \ln |R_0(\omega)| + \ln |R_{0hm}| \} / (2b_m), \quad (56)$$

Поскольку  $\delta$  мало и относительно слабо зависит от частоты, то волновые числа мод резонатора являются почти эквидистантными по индексу  $p$  со средним расстоянием  $\Delta\omega = \pi c/b_m$ , близким к спектру цилиндрического резонатора с радиусом  $b_m$ .

При  $|D| \approx |R_0| \approx |R_{0hm}| \approx 1$  добротности мод можно представить как  $Q = k'/2k'' = 2kb_m/(\Delta_r + \Delta_g + \Delta_{0hm})$ , где  $\Delta_r \approx 1 - |D|^2$  — дифракционные потери на излучение за время прохождения волной расстояния  $2b_m$ , связанные с конечностью размеров эшелеттной поверхности по координате  $z$ ,  $\Delta_{0hm}$  — омические потери за то же время,  $\Delta_g \approx 1 - |R_0|^2$  — потери на излучение, обусловленные неполным отражением волны от эшелетта в обратном направлении [2-4].

Величины  $\Delta_{0hm}$ ,  $\Delta_r$  связаны с нежелательными потерями. Их необходимо иметь как можно меньше.  $\Delta_{0hm}$  — омические потери в миллиметровом диапазоне длин волн при отражении от меди составляет доли процента.  $\Delta_r$  — дифракционные потери являются функцией параметра  $M = kL/\sqrt{2\nu(1 - m^2/\nu^2)}$ , где  $\nu = kb_m$ , и при длинах резонатора  $L \approx (10-20)\lambda$ ,  $\nu \approx 50$  потери на излучение могут быть уменьшены до величин порядка долей процента.

Селективные свойства эшелеттного резонатора связаны с достаточно сильной зависимостью величины  $\Delta_g$  от частоты и профиля решётки\*. Сравнение значений "полезных" потерь  $\Delta_g(\omega)$  с аналогичной величиной для цилиндрического резонатора показывает, что нагруженная добротность эшелеттного резонатора может быть примерно на порядок ниже нагруженной добротности цилиндрического резонатора при достаточно высокой селекции [8].

Рассмотрим работу МЦР-приборов с резонаторами эшелеттного типа. Отметим, что в силу высокой селективности эшелеттного резонатора, их можно использовать в гиротронах на гармониках гирочастоты, не опасаясь возбуждения низших гармоник. Структуры полей в них вблизи электронного пучка близки к структурам полей в цилиндрическом резонаторе. Основываясь на этом и следуя [9], мы определим пусковые токи  $I_{st}^{\min}$  гиротрона с эшелеттным резонатором. Поскольку структура поля в зависимости от продольной координаты имеет колоколообразный вид с

\*Подбором профиля решётки можно сделать полосу коэффициента отражения достаточно узкой [12].

характерной шириной  $L$ , то для определения пускового тока  $I_{st}^{\min}$  моды, находящейся в центре линии усиления, получим следующее выражение

$$2^{1/2} \pi^{3/2} e^{-1/2} \{e^0 / mc^3\} \{n^n / (2^n n!)\}^2 \cdot \\ \cdot \beta_{\perp}^{2n} \beta_{\parallel}^{-3} I_{st}^{\min} Q k L^2 J_{m-n}^2(kr_b) \{b + \text{Ltg} \theta / 2\}^{-1} = 1, \quad (6)$$

где  $e^0$  — модуль величины заряда электрона,  $m$  — масса электрона,  $c$  — скорость света,  $n$  — номер гармоники,  $\beta_{\perp} = v_{\perp} / c$  и  $\beta_{\parallel} = v_{\parallel} / c$ ,  $v_{\perp}$  и  $v_{\parallel}$  — поперечная и продольная составляющие скорости электрона на входе в резонатор,  $Q$  — добротность моды,  $k = 2\pi / \lambda$ ,  $J_{m-n}$  — функция Бесселя,  $r_b$  — расстояние центров вращения электронов от оси. При условии  $m \ll kr_b$  формула для  $I_{st}^{\min}(A)$ , измеряемого в амперах, упрощается

$$I_{st}^{\min}(A) = 0,2 \cdot 10^4 \cdot \beta_{\parallel}^3 \beta_{\perp}^{-2n} \{2^n n! / n^n\}^2 \Delta r_b \lambda / L^2, \quad (7)$$

где  $\Delta = \Delta_r + \Delta_g + \Delta_{ohm}$ .

Определённые таким образом пусковые токи гиротрона с эшелеттным резонатором показывают, что они составляют величины порядка нескольких ампер для гиротронов на первых двух гармониках гирочастоты. В гиротронах на более высоких гармониках гирочастоты пусковые режимы при приемлемых значениях токов достигаются только при существенном увеличении длины резонатора.

На основе работ [10, 11] могут быть определены оптимальные значения токов и длин резонаторов, необходимых для достижения максимальной эффективности. В предположении близости структуры поля к колоколообразной, которая, в свою очередь, заменяется гауссовой с обрезанием вытянутых крыльев последней [1], для оптимальной величины тока  $I_s$  имеем:

$$I_s \approx K I_{st}^{\min} \mu^3, \quad (8)$$

где  $\mu = \pi \beta_{\perp}^2 L / \lambda \beta_{\parallel}$ , а коэффициент  $K$  слабо зависит от номера гармоники. Для  $n = 1, 2, 3$   $K \approx 0,015$  при оптимальной длине  $\mu \approx 17$ . Необходимо иметь в виду, что максимальная эффективность достигается не в центре линии усиления, а при значительной отстройке от неё. Расчёты по (8) дают, что на первых двух гармониках при приемлемых токах достижима высокая эффективность работы, сравнимая с эффективностью гиротронов с традиционными резонаторами. На более высоких гармониках при приемлемых токах генерация может иметь место только при более низкой эффективности. Однако этот вопрос требует дополнительного исследования.

Эксперименты с гиротронами с эшелеттными резонаторами проводились при рабочем напряжении  $U \approx 80$  кВ и длительности импульса

$\tau = 40$  мсек. В экспериментах была испытана серия из шести резонаторов, рассчитанных на симметричную моду  $H_{0,6,1}$  с длиной волны  $\lambda \approx 3$  мм, возбуждаемую на первой гармонике гирочастоты. Радиальный индекс  $p$  мы относим ко входному наименьшему диаметру эшелетт-ного резонатора. Все резонаторы имели профиль, показанный крупным планом на рис. 1, и отличались друг от друга внутренним диаметром  $2b$ , причём входной диаметр менялся от  $2b = 23,75$  мм до  $2b = 23,95$  мм с шагом 0,04 мм. Геометрия профиля была выбрана на основе расчётов [12] с учётом возможности контроля точности изготовления резонатора. Относительно большая длина  $L \approx 12\lambda$  определялась надёжностью получения генерации, поскольку при более длинном резонаторе генерация достигается легче.

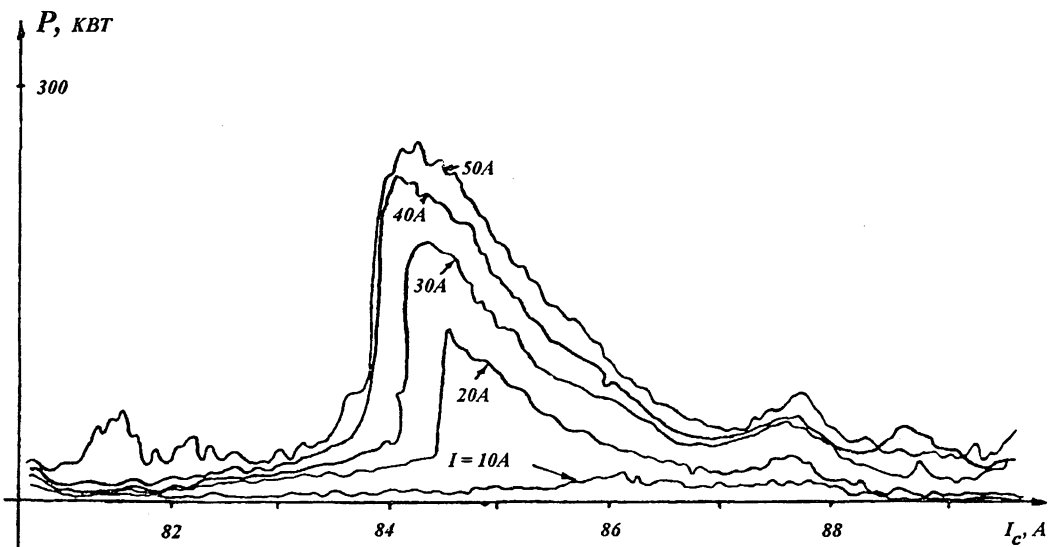


Рис. 2. Зависимость мощности гиротрона от магнитного поля.

Результаты экспериментальных исследований зависимости мощности от тока сверхпроводящего соленоида (пропорционального величине статического магнитного поля) при различных значениях тока электронного пучка для резонатора с  $2b = 23,87$  мм\* представлены на рис. 2\*\*. В широком интервале изменения величины статического магнитного поля  $\Delta H/H \approx 10\%$  возбуждалась практически одна рабочая мода. Единственная из низкочастотных (по отношению к рабочей) паразитных мод, конкуренция со стороны которых и препятствует получению эффективной

\*Для остальных резонаторов получены близкие, но несколько худшие — меньшие по мощности и КПД на 10–15% — результаты.

\*\*Сравнительно большая изрезанность кривых обусловлена недостатками используемого нами самописца.

генерации в гиротронах с цилиндрическими резонаторами, заметно проявлялась лишь при токе  $I \approx 50$  А, существенно превышающем оптимальные значения. Большая величина стартового тока паразитных колебаний свидетельствует об их низкой добротности и согласуется с теоретическими оценками. Во всех экспериментах наблюдалась низкая эффективность, нигде не превышающая величины 15%. Это может объясняться как слишком большой длиной резонатора, так и "провисанием" потенциала электронного пучка в эшелеттных резонаторах.

Проведённые исследования гиротронов с эшелеттными резонаторами подтвердили возможность существенного разрежения спектра генерации гиротрона. Даже при полученной эффективности они являются перспективными на длинах волн  $\lambda \approx 1$  мм, где использование традиционных резонаторов затруднительно.

Работа выполнена при поддержке Международного Научного Фонда по проекту R8Y300 Theoretical and experimental study of eshелette-type resonators for high power gyrotrones и Российского фонда фундаментальных исследований, грант 93 – 02 – 15423.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Галонов А. В., Гольденберг А. Л., Григорьев Д. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 1975. Т. 18. № 2. С. 281.
2. Косарев Е. Л. // Письма в ЖЭТФ, 1966. Т. 3. № 7. С. 295.
3. Electromagnetic Theory of Grating /Ed. by R. Petit. — Berlin–Heidelberg–New York: Springer–Verlag, 1980.
4. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решётки. — Киев: Наукова думка, 1986.
5. Авербах В. С., Власов С. Н., Таланов В. И. // Изв. вузов. Радиофизика, 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1333.
6. Goubau G., Schwering F. — In: Electromagnetic wave theory, Proceedings of a Symposium held at Delft, Netherlands. Part 1. — Pergamon Press, 1967. P. 531.
7. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. — М.: Сов. радио, 1966. С. 476.
8. Власов С. Н., Копосова Е. В. Аксиально-симметричные резонаторы эшелеттного типа // ЖТФ, 1966. Т. 66. № 2.
9. Петелин М. И. — В кн.: Гиротрон. Сб. научн. тр. /Под ред. А. В. Галонова–Грехова. — Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 77.
10. Юлпатов В. К. — Гиротрон. Сб. научн. тр. /Под ред. А. В. Галонова–Грехова. — Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 26.

11. Белоусов В. И., Ергаков В. С., Моисеев М. А. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1978. № 9. С. 41.
12. Копосова Е. В. Эшелетт для волн  $E$ -поляризации: ступенчатые поверхности с прямоугольной канавкой на ступеньке // ЖТФ, 1995. Т. 65. № 3.

Институт прикладной физики  
РАН, г. Н. Новгород

Поступила в редакцию  
29 января 1996 г.

### GYROTRONS WITH ECHELETTE RESONATORS

*S. N. Vlasov, E. V. Kopusova, A. B. Pavelyev, V. I. Khizhnyak*

The gyrotrons with echelette resonators formed by grating on inner surface of cone are considered. The grating ribs are perpendicular to the cone axis. The quality factor of the working mode is controlled by choosing the grating parameters. The selection is determined by the dependence of the anti-mirror reflection coefficient on the frequency. Such resonators have a higher selection and they are more effective by coupled with the output waveguide than cylindrical resonators that permits to increase the gyrotron power. The echelette resonators can be used in gyrotrons at higher harmonics of the cyclotron frequency due to their high selection. The starting currents and efficiency of the gyrotron with echelette resonator have been found. The experimental investigations of gyrotrons with echelette resonators confirmed the possibility to rarefy significantly the spectrum of gyrotron generation.