

09

АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ЭШЕЛЕТНОГО ТИПА

© С.Н.Власов, Е.В.Копосова

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия
(Поступило в Редакцию 5 декабря 1994 г.
В окончательной редакции 26 сентября 1995 г.)

Для увеличения мощности гиротронов предлагается новый тип резонаторов — аксиально-симметричные резонаторы эшелетного типа, представляющие собой гофрированную коническую поверхность. Добротность рабочей моды такого резонатора может быть существенно ниже минимальной дифракционной добротности традиционного цилиндрического резонатора. На основе теории рассеяния плоской волны на эшелетте в квазиоптическом приближении строится теория таких резонаторов. Определяется спектр собственных колебаний. Исследуются селективные свойства и возможность управления ими путем подбора формы гофра. Показано, что путем оптимального выбора параметров эшелеттной поверхности и конфигурации резонатора спектр его может быть существенно разрежен. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретические представления.

1. Традиционно в гиротронах используются резонаторы в виде труб с переменным сечением. Для увеличения мощности гиротрона приходится 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, λ — длина волны, $k = 2\pi/\lambda$, а добротность паразитных мод должна быть ниже. В настоящей работе исследуются резонаторы для гиротронов, имеющие при высокой селекции существенно более низкую, чем (1), добротность рабочей моды.

Снижение добротности может быть получено в резонаторах эшелетного типа (рис. 1), образованных дифракционными решетками на внутренних стенках конической поверхности со штрихами, перпендикулярными оси конуса. Параметры решетки подбираются так, чтобы падающая на нее волна рассеивалась в двух направлениях: обратном

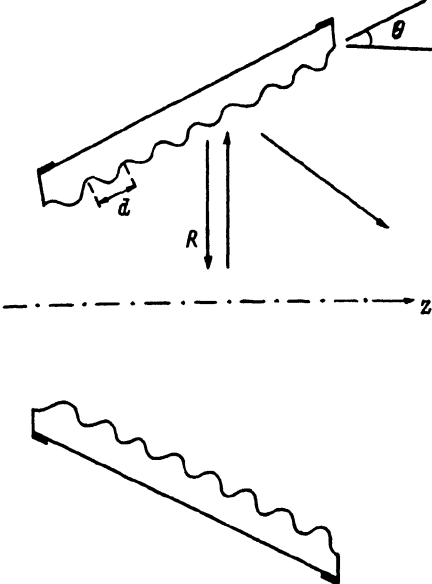


Рис. 1. Аксиально-симметричный резонатор с эшелеттом в качестве боковой стенки. Организация в нем модовой структуры и вывода излучения.

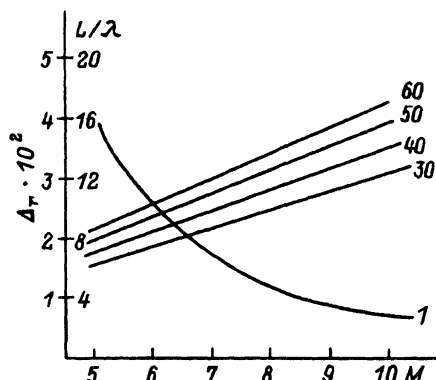


Рис. 2. Зависимость потерь на излучение и длины резонатора от параметра M .

(для организации рабочей моды) и зеркальном (для вывода излучения из резонатора). Отношение энергий между обратным и зеркальным лучом определяется формой и амплитудой гофра [2-4], чем обеспечивается управление добротностью рабочей моды резонатора.

Селективные свойства резонатора определяются зависимостью обратного коэффициента отражения $R(\omega)$ от частоты [5-7] [$|R(\omega_0)| \approx 1$ только на рабочей частоте ω_0] и появлением угла перекоса $\gamma \approx (1/2)\xi(\omega - \omega_0)/\omega_0$ [5] между падающим и отраженным лучом на нерабочих частотах ω (ξ — параметр углочастотной чувствительности).

2. Расчет аксиально-симметричных резонаторов эшелеттного типа произведем в квазиоптическом приближении, используя результаты численного анализа задачи дифракции плоской волны на идеально проводящих решетках, полагая радиус b — расстояние от оси до вершины ближайшего зубца эшелеттной поверхности и длину L резонатора существенно превосходящими длину волны λ и период гофра d .

Продольное магнитное поле резонатора представим в виде суммы двух радиальных пучков, распространяющихся от оси и к оси. Их амплитуды Ψ_+ и Ψ_- на поверхности радиуса b , при $kb \gg m$ (m — азимутальный индекс) связаны интегральным соотношением [8,9]

$$\Psi_+(z_2, b) = e^{iF} \sqrt{\frac{ik}{4\pi b_m}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp[-ik(z_1 - z_2)^2/4b_m] \Psi_-(z_1, b) dz_1, \quad (2)$$

где $F = 2 \operatorname{arg}(H_m^{(1)}(kb)) + \pi$, $b_m = b\sqrt{1 - m^2/(kb)^2}$, $H_m^{(1)}$ — функция Ханкеля.

Пренебрегая рассплыванием пучка при его распространении в области $r > b$ и считая его спектр по продольному волновому числу достаточно узким, в режиме, близком к автоколлимации, представим коэффициент отражения следующим образом [5]:

$$R(\omega) = |R_0(\omega)R_{om}|e^{i(k\gamma z + \Phi)}, \quad (3)$$

где R_0 — коэффициент отражения в обратном направлении от плоской решетки с тем же профилем гофра; R_{om} — омический коэффициент отражения от решетки, который по порядку величины равен омическому коэффициенту отражения от гладкой поверхности; Φ — фаза коэффициента отражения от эшелеттной поверхности относительно ближайшей к оси точки зубца.

Множитель $e^{i\gamma kz}$ введен для учета угловой дисперсии эшелетта. Связь между падающим и отраженным пучками на эшелеттной поверхности имеет вид $\Phi_-(z_1, b) = R(\omega)\Phi_+(z_1, b)$.

Соотношение (2) представляет уравнение для определения собственных частот рассматриваемого резонатора, если известен $R(\omega)$. Они определяются из выражения

$$\ln |D| + i \arg D + \ln |R(\omega)| + i \arg R(\omega) - iF = 2i\pi p, \quad (4)$$

где $p \gg 1$ — радиальный индекс моды, D — собственное значение интегрального уравнения [9]

$$D\Phi(z_2) = \sqrt{\frac{ik}{4\pi b_m}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp[-ik(z_1 - z_2)^2/4b_m - i\gamma kz_1] \Psi(z_1) dz_1. \quad (5)$$

Применяя асимптотику Лебая для цилиндрических функций и ограничиваясь первым членом, получим выражение для действительной k' и мнимой k'' частей волнового числа собственных колебаний

$$k' = \frac{1}{b} \left\{ \pi \left(\frac{m}{2} + p - \frac{3}{4} \right) - \frac{m^2}{2\pi \left(\frac{m}{2} + p - \frac{3}{4} \right)} + \delta \right\}, \quad \delta = \frac{1}{2} [\arg R + \arg D],$$

$$k'' \approx -\{\ln |D| + \ln |R_0(\omega)| + \ln |R_{om}|\}/(2b). \quad (6)$$

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

При $|D| \approx |R_0| \approx |R_{om}| \approx 1$ добротности мод можно представить как $Q = k'/2k'' = 2kb/(\Delta_r + \Delta_g + \Delta_{om})$, где $\Delta_r \approx 1 - |D|^2$ — относительные потери на излучение за время прохождения волной расстояния $2b$, связанные с конечностью размеров эшелеттной поверхности по координате z ; Δ_{om} — омические потери за то же время; $\Delta_g \approx 1 - |R_0|^2$ — потери на излучение, обусловленные неполным отражением эшелеттом волны в обратном направлении [2-4]:

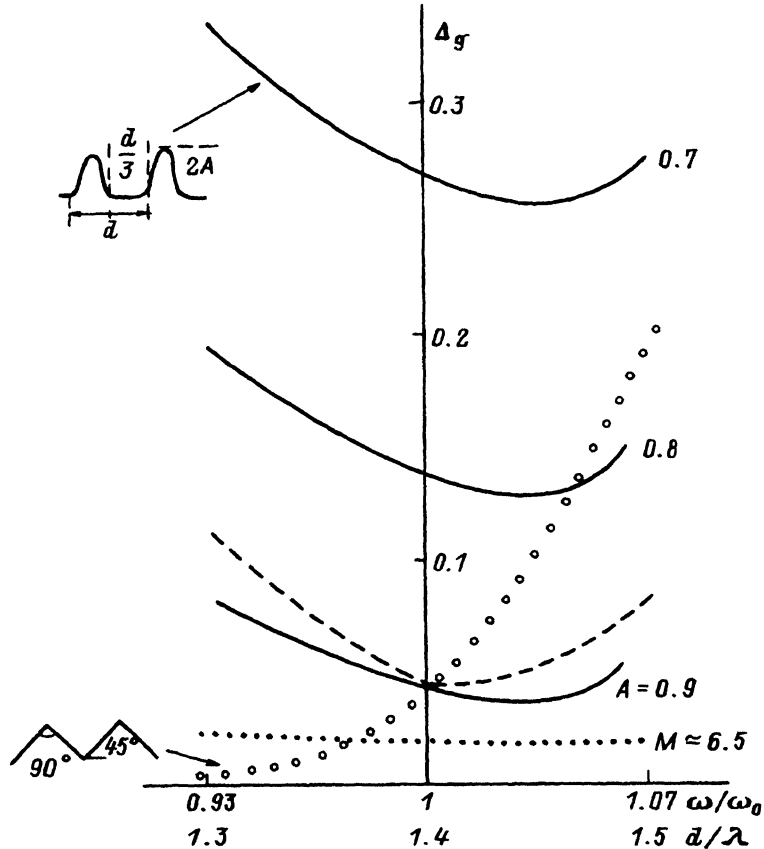


Рис. 3. Зависимость потерь, связанных с отклонением R_0 от единицы, от частоты для различных $R_{0\max}$ для профилей гофра определенных форм (цифры у кривых — значения ν).

Величины Δ_r и Δ_{om} связаны с нежелательными потерями, их необходимо иметь как можно меньше. Δ_{om} в миллиметровом диапазоне длин волн при отражении от меди составляет доли процента. Δ_r является функцией параметров $M = kL/\sqrt{2\nu\{1 - m^2/\nu^2\}}$, где $\nu = kb$ и $\Gamma = \gamma kL/2$; при $\gamma = 0$ Δ_r показана на рис. 2 (кривая 1); там же приведены прямые зависимости длины резонатора от M при различных минимальных диаметрах резонатора. При длинах $L \approx (10-20)\lambda$ потери на излучение могут быть уменьшены до величин порядка процента.

Селективные свойства эшелетного резонатора связаны с достаточно сильной зависимостью величины Δ_g от частоты и профиля решетки. На рис. 3 показаны Δ_g как функции частоты для некоторых характерных профилей решетки, схематично представленных на том же рисунке, при использовании результатов численного анализа рассеяния плоской решетки с соответствующим профилем [2-4]. Различные значения $\Delta_g(\omega_0)$ определяют добротность связи рабочей моды. Там же приведена точками кривая, характеризующая аналогичную зависимость Δ_{gc} для традиционного цилиндрического резонатора, полученную из равенства $Q_{min} = 2kb/\Delta_{gc}$, причем сравниваемый резонатор

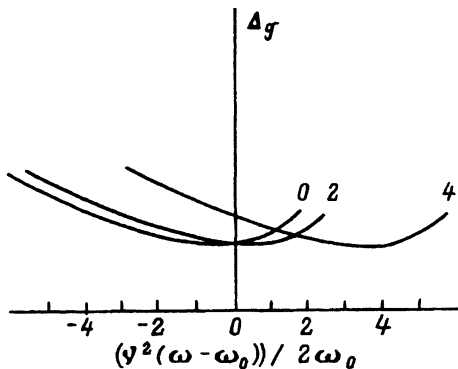


Рис. 4. Селекция мод с различными азимутальными индексами m .

был выбран достаточно коротким: его параметр $M = 6.5$. Следует иметь в виду, что путем изменения в небольших пределах радиуса резонатора b частота рабочей моды ω_p может быть совмещена с ω_0 , что является наиболее благоприятным для обеспечения высокой селективности.

Сравнение значений $\Delta_g(\omega_0)$ и Δ_{gc} показывает, что нагруженная добротность эшелеттного резонатора может быть примерно на порядок ниже нагруженной добротности цилиндрического резонатора при достаточно высокой селекции. Сначала рассмотрим симметричные моды с азимутальным индексом $m_0 = 0$ и радиальным p . Если рабочей является мода с индексом $p_p \approx 10$, то добротности мод с индексами $p_p \pm 1$ будут, согласно рис. 3, в несколько раз ниже добротности рабочей. Следует заметить, что селекция по радиальному индексу p будет выше вследствие наличия углочастотной чувствительности эшелетта, приводящей к дополнительным потерям на нерабочих модах, что качественно проиллюстрировано пунктиром на рис. 3.

Рассмотрим несимметричные моды с малым азимутальным индексом $m \ll kb$. Волна, организующая такую моду, рассеивается с теми же коэффициентами рассеяния, что и волна, имеющая в качестве волнового вектора проекцию вектора падающей волны на плоскость, нормальную штрихам решетки $^{[2,3]} R(\alpha, \theta, k) = R(\alpha = \pi/2, \theta, k \sin \alpha)$, где $\alpha = \arccos(m/kb)$ — угол между вектором падения волны и штрихами решетки $^{[3]}$, θ — угол полураскрыва резонатора. Следовательно, чтобы рабочая мода с индексами m_0, p_0 и волновым числом k_0 была высокодобротной, она должна попасть в полосу, смещенную относительно центра полосы симметричных высокодобротных мод на величину, равную $|k - k \sin \alpha|/k$,

$$\delta\omega_{cm}/\omega = |k_0 - k_{\text{sim}}|/k = \frac{m_0^2}{2k_{\text{sim}}^2 b^2}, \quad (7)$$

где k_{sim} — волновое число, соответствующее максимальному коэффициенту отражения в частотной полосе для симметричных мод.

Кривые Δ_g несимметричных мод на рис. 3 для моды $A_0 = 0.9$, смещенной в соответствии с (7), в случае выбора в качестве рабочей моды, симметричной при $kb \approx 30$, приведены на рис. 4. Они показывают, что

добротности несимметричных мод с близкими к рабочей моде частотами ($m = 2, 4; \Delta p = 2, 2$) лишь немного ниже добротности рабочей моды, т.е. имеет место сравнительно небольшая селекция. Она может быть значительно увеличена при переходе на работу на несимметричных модах с индексом m_0 , когда центры полос соседних мод разнесутся на величину $2m_0/(kb)^2$. Таким образом, при характерных размерах $L \approx b \approx 10\lambda$ и выборе в качестве рабочей несимметричной моды с индексом $m_0 \sim 8-10$ в спектре резонатора будет существовать единственное высокодобротное колебание.

3. Экспериментальные исследования проводились с резонаторами, профиль гофра которых показан в левом нижнем углу на рис. 3 и представлял собой равнобедренный треугольник с прямым углом при вершине с периодом гофра $d/\lambda \approx 1.3$, $d = 2.25 \pm 0.01$ мм и углом падения волны (углом полураскрыва резонаторов) $\theta = 23^\circ$. Выбор профиля связан с простотой в изготовлении при обеспечении высокого коэффициента отражения в обратном направлении (теоретически $|R| \approx 1$) волны, организующей H -моду. Диаметр измерялся по узкому концу. Эшелетная поверхность содержала 15 зубцов, длина резонаторов $L \sim 23$ мм.

$2b \pm 0.01$ мм	Спектр m, p, q	ν , МГц	$Q \pm 20\%$
16.08	$H_{0,9,1}$	168540	7000
	$H_{2,8,1}$	168420	3000
	$H_{4,7,1}$	168200	1000
15.99	$H_{0,9,1}$	169220	2000
	$H_{2,8,1}$	169100	5000
	$H_{4,7,1}$	168880	3000
	$H_{6,6,1}$	168560	1000
15.97	$H_{0,9,1}$	169380	1500
	$H_{2,8,1}$	169260	5000
	$H_{4,7,1}$	169040	4000
	$H_{6,6,1}$	168700	1000
15.95	$H_{0,9,1}$	169540	500
	$H_{2,8,1}$	169420	4000
	$H_{4,7,1}$	169200	4500
	$H_{6,6,1}$	168880	1500
15.91	$H_{2,8,1}$	169760	1000
	$H_{4,7,1}$	169540	4000
	$H_{6,6,1}$	169280	2000
15.87	$H_{4,7,1}$	169860	2500
	$H_{6,6,1}$	169520	3000
15.83	$H_{4,7,1}$	170200	500
	$H_{6,6,1}$	169800	3500
15.79	$H_{6,6,1}$	170520	4000
15.75	$H_{6,6,1}$	170860	3500
15.71	$H_{6,6,1}$	171200	3000
15.67	$H_{6,6,1}$	171540	2500

Возбуждение осуществляется через отверстие связи в стенке ζ помощью прямоугольного волновода. Для определения азимутального индекса было выполнено несколько отверстий, расположенных под различными углами друг к другу.

Как видно из таблицы, при изменении радиуса резонатора спектр его менялся качественно согласно формуле (6). При этом высокую добротность имели моды с различными азимутальными индексами. Так, при выборе в качестве рабочей моды симметричной в спектре резонатора присутствовали также моды с индексами $m = 2$ и 4 и теми же радиальными p и продольным $q = 1$. При выборе же в качестве рабочей моды с азимутальным индексом $m = 6$ в спектре резонатора она оказывалась единственной. Таким образом, полоса эффективного отражения эшелеттной поверхности для мод с различными азимутальными индексами смещалась согласно (7). При этом добротность рабочих мод в центре полосы с ростом m падала. Это могло быть связано с нарушением квазиоптического приближения в узком конце резонатора при $m \geq 4$.

Проведенные исследования показали, что аксиально-симметричный резонатор с эшелеттным профилем боковой поверхности обладает высокими селективными свойствами и возможностью выбора добротности рабочей моды в широком диапазоне.

Авторы благодарны В.И. Курбатову за изготовление резонаторов и В.В. Паршину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Международного Научного Фонда по проекту R8Y000 Theoretical and experimental study of eshellette-type resonators for high power gyrotrones и Российского фонда фундаментальных исследований, грант 93-02-15423.

Список литературы

- [1] Петелин М.И. // Гиротрон / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Сб. науч. тр. Горький, 1981. С. 77.
- [2] Electromagnetic Theory of Grating / Ed. R.Petit. Berlin, Heidelberg; New York: Springer Verlag, 1980.
- [3] Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А., Сиренко Ю.К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки. Киев: Наукова думка, 1986.
- [4] Копосова Е.В. (Шейнина). // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 6. С. 885-888.
- [5] Аверков С.И., Фурашов М.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12. № 12. С. 1532-1545.
- [6] Косарев Е.Л. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3. Вып. 7. С. 295-298.
- [7] Авербах В.С., Власов С.Н., Таланов В.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9-10. С. 1333-1357.
- [8] Goubau G., Schwering F. // Electromagnetic wave theory. Proc. Delft. Symp. Netherlands. Pt. 1. Pergamen Press, 1967. P. 531-541.
- [9] Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 476 с.