

# 11 Селективный рефлектор моды шепчущей галереи с большим азимутальным индексом для входного резонатора гироклистрона

© Ю.Ю. Данилов

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

(Поступило в Редакцию 27 сентября 2013 г.)

Предложен селективный рефлектор в виде резонансного расширения для входного резонатора 8-мм гироклистрона на моде шепчущей галереи  $H_{m,1}$  с азимутальным индексом, составляющим несколько десятков. Представлены результаты моделирования селективного рефлектора.

Ведущая разработка 8-мм гироклистронов на высоких несимметричных модах [1–5] требует оптимизации входного резонатора, чтобы исключить возбуждение околорезонансных паразитных мод. Для входного резонатора гироклистрона на моде  $H_{m,1}$  с азимутальным индексом менее 10 созданы селективные возбудители на основе одномодового прямоугольного волновода или встроенного в резонатор под оптимизированным углом [1–3], или огибающего резонатор и связанного с ним посредством оптимизированной системы отверстий в общей стенке [4,5]. Однако при дальнейшем увеличении азимутального индекса рабочей моды число околорезонансных паразитных мод возрастет на порядок, и в этом случае селекцию мод может обеспечить оптимизированный рефлектор, поскольку различие дифракционных добротностей рабочей моды  $H_{m,1}$  и околорезонансных паразитных мод определяется их коэффициентами отражения  $|R_{1,2}|^2$  от торцов резонатора [6]

$$Q_{\text{diff}} \propto 1 / [(1 - |R_1|^2) + (1 - |R_2|^2)].$$

Таким рефлектором может быть резонансное расширение, компактное и не затрудняющее транспортировку электронного пучка.

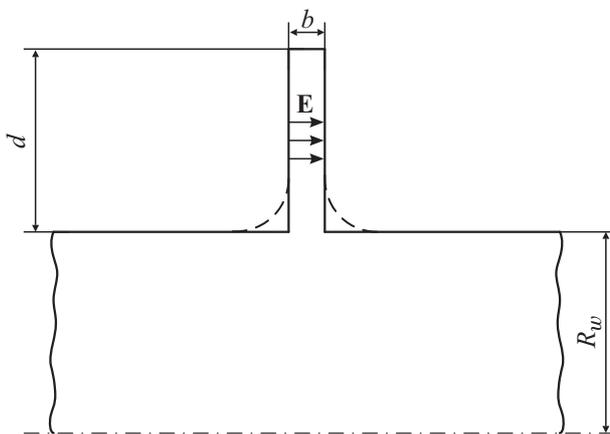


Рис. 1. Резонансное расширение в цилиндрическом волноводе (штриховая линия — электрооптический вариант).

Структура электромагнитного поля вращающейся моды  $H_{m,1}$  с большим азимутальным индексом схожа со структурой основной моды прямоугольного волновода, для которой хорошо известен узкополосный рефлектор в виде резонансного расширения в  $E$ -плоскости [7–9] с коэффициентом отражения  $R$  стандартного вида [10]

$$R(\omega) = \frac{i\omega'_0/2Q_{\text{ext}}}{\omega - \omega'_0 - i\omega'_0/2Q_{\text{ohm}} - i\omega'_0/2Q_{\text{ext}}},$$

где  $\omega'_0$  — действительная часть собственной частоты резонансного расширения,  $Q_{\text{ohm}}$  и  $Q_{\text{ext}}$  — его омическая добротность и добротность связи с волноводом. Можно ожидать, что узкая частотная полоса аналогичного резонансного расширения в цилиндрическом волноводе (рис. 1)  $b < \lambda/2$ ,  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве) сделает его эффективным селективным рефлектором моды  $H_{m,1}$  с большим азимутальным индексом, так как его воздействие на моды  $H_{m,1}$  с другими азимутальными индексами будет мало.

Численное моделирование селективного рефлектора проводилось посредством метода матрицы рассеяния [11–13]. Омические потери полагались отсутствующими. Глубина рефлектора  $d$ , соответствующая максимальному отражению заданной моды  $H_{m,1}$ , подбиралась при фиксированных значениях частоты (частота 8-мм гироклистронного комплекса [2–5], равная 35.5 GHz), ширины рефлектора  $b$  и угла Бриллюэна

$$\theta_{m,1} = \arcsin(\mu_{m,1}\lambda/2\pi R_w),$$

где  $R_w$  — радиус цилиндрического волновода,  $\mu_{m,1}$  — 1-й корень производной функции Бесселя  $m$ -го порядка. Угол Бриллюэна выбирался близким к  $90^\circ$ , так как рабочая частота входного резонатора гироклистрона близка к критической частоте рабочей моды.

Результаты моделирования приведены для моды  $H_{37,1}$  (при  $\theta_{37,1} = 82^\circ$ ), у которой отличие ее корня производной функции Бесселя  $\mu_{37,1}$  от корня  $\mu_{31,2}$  ближайшей к ней моды  $H_{31,2}$  составляет 0.0064%. Наибольшее отражение от оптимизированного для моды  $H_{37,1}$  рефлектора (рис. 2) —  $b/\lambda = 0.1$ ,  $d/\lambda = 0.52$  — имела ближайшая мода шепчущей галереи  $H_{36,1}$  (рис. 3).

Отражение других мод оказалось существенно меньшим (рис. 3). Зависимость добротности связи с волноводом оптимизированного рефлектора от его ширины имела вид  $Q_{\text{ext}} \propto 1/b$  (рис. 4).

Для рефлекторов мод шепчущей галереи с другим азимутальным индексом в диапазоне  $10 \leq m \leq 40$  зависимости, аналогичные приведенным на рис. 2–4, отличались в пределах  $\pm 10\%$ .

Чтобы обеспечить электропрочность, позволяющую использовать такой рефлектор в мегаваттном 8-мм гироклистроне, в его конфигурацию достаточно ввести скругления в местах сочленений волновода и резонанс-

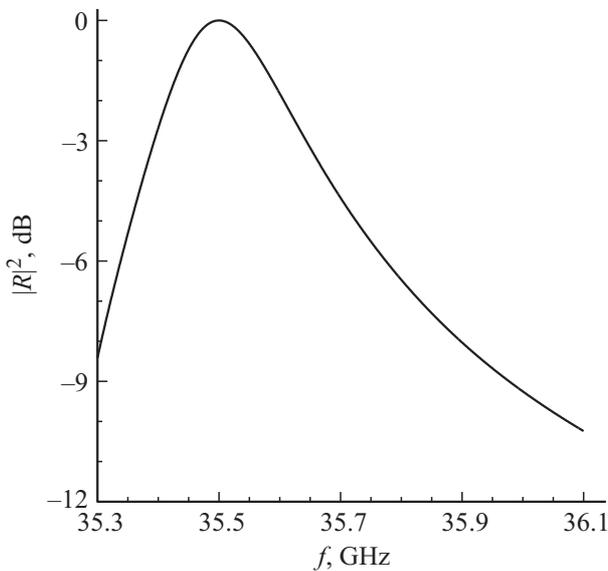


Рис. 2. Коэффициент отражения моды  $H_{37,1}$  от оптимизированного рефлектора.

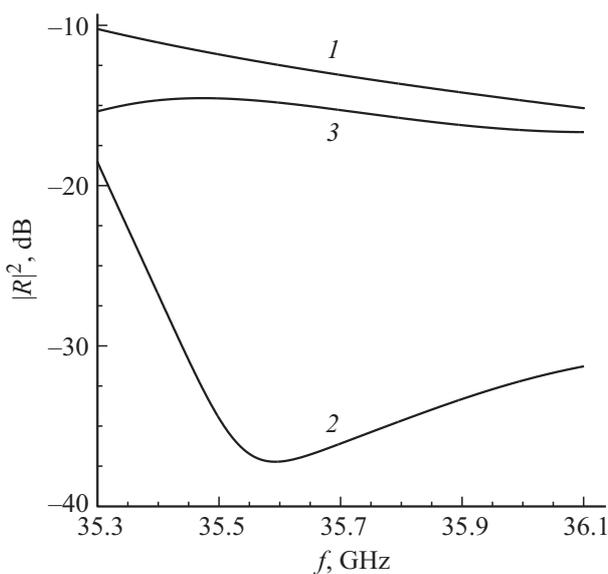


Рис. 3. Коэффициенты отражения от оптимизированного для моды  $H_{37,1}$  рефлектора для мод: 1 —  $H_{36,1}$ , 2 —  $H_{31,2}$ , 3 —  $H_{20,5}$ .

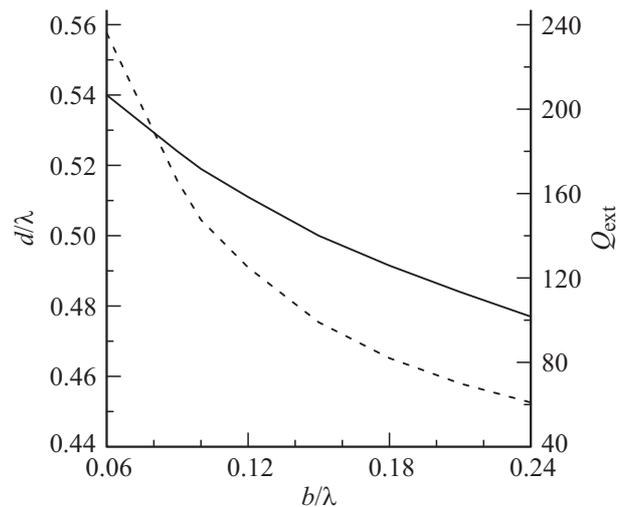


Рис. 4. Зависимость глубины  $d$  (сплошная линия) и добротности связи (штриховая линия)  $Q_{\text{ext}}$  оптимизированных рефлекторов от их ширины  $b$ .

ного расширения (рис. 1). Уже при радиусе скругления сочленений  $\sim \lambda/40$  максимальное значение электрического поля на стенке рефлектора, оптимизированного для вращающейся моды  $H_{m,1}$  ( $10 \leq m \leq 40$ ), не превышало  $10 \text{ kV/cm}$  при мощности исходного сигнала  $10 \text{ kW}$ . Такое ограничение мощности представляется приемлемым, так как для существующих 8-мм гироклистронов вне зависимости от азимутального индекса рабочих мод —  $m = 0$  [14,15],  $m = 5$  [2],  $m = 7$  [3] — было достигнуто усиление  $30 \text{ dB}$  и более, того же можно ожидать и при азимутальном индексе  $m$ , составляющим несколько десятков.

## Список литературы

- [1] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кузиков С.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 10-11. С. 830–834.
- [2] Zaitsev N.I., Danilov Yu.Yu., Gvozdev A.K. et al. // Proc. 9th Intern. Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications. N. Novgorod, 2011. P. 140.
- [3] Зайцев Н.И., Гузнов Ю.М., Запелалов С.А. и др. // Тез. докл. IX Всерос. семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Н. Новгород, 2013. С. 44–45.
- [4] Данилов Ю.Ю. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 12. С. 53–58.
- [5] Данилов Ю.Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 8–9. С. 696–700.
- [6] Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высшая школа, 1990. 336 с.
- [7] Модель А.М. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах. М.: Связь, 1967. 352 с.
- [8] Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. М.: Связь, 1971. 440 с.
- [9] Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Рудь Л.А. Резонансное рассеяние волн. Т. 2. Волноводные неоднородности. Киев: Наукова думка, 1986. 216 с.

- [10] *Тишер Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 368 с.
- [11] *Omar A.S., Schunemann K.* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1985. Vol. 33. N 9. P. 765–770.
- [12] *Neilson J.M., Latham P.E., Caplan M., Lawson W.G.* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1989. Vol. 37. N 8. P. 1165–1170.
- [13] *Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V.* // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. 1995. Vol. 16. N 4. P. 745–752.
- [14] *Засыпкин Е.В.* // Вакуумная СВЧ-электроника / Под ред. М.И. Петелина. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2002. С. 77–86.
- [15] Справочник по вакуумной электронике. Компоненты и устройства / Под ред. Дж. Айхмайера, М. Тамма. М: Техносфера, 2012. 504 с.