

А. И. Горошко, В. К. Киселев

**ЗАГРАЖДАЮЩИЙ ФИЛЬТР ПОБОЧНЫХ ГИБРИДНЫХ МОД  
ПОЛОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА  
СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: a\_goroshko@ire.kharkov.ua*

Проведен анализ и экспериментальное исследование макета заграждающего фильтра гибридных мод  $HE_{12}$  и  $HE_{-11+31}$  в круглом полом диэлектрическом волноводе. Фильтр образован отрезком волновода, ограниченным двумя плоскими одномерными проволочными решетками. Фильтр позволяет обеспечить подавление побочных мод до 15...20 дБ при затухании рабочей моды  $HE_{11}$  до 3 дБ на частоте 300 ГГц в волноводе диаметром 20 мм. Ил. 5. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** субмм диапазон длин волн, полой диэлектрический волновод, подавление гибридных мод.

Рабочей модой в круглых полых диэлектрических волноводах (ПДВ) [1–5] является линейно поляризованная гибридная мода  $HE_{11}$ . Наряду с ней, при запитке волновода, а также на изгибах, изломах, разрывах волновода возбуждаются побочные линейно поляризованные гибридные моды  $HE_{12}$  и  $HE_{-11+31}$  [3]. Характер электрического поля в поперечном сечении волновода диаметром  $2a$  с радиальной координатой  $r$  для указанных мод представлен на рис. 1.

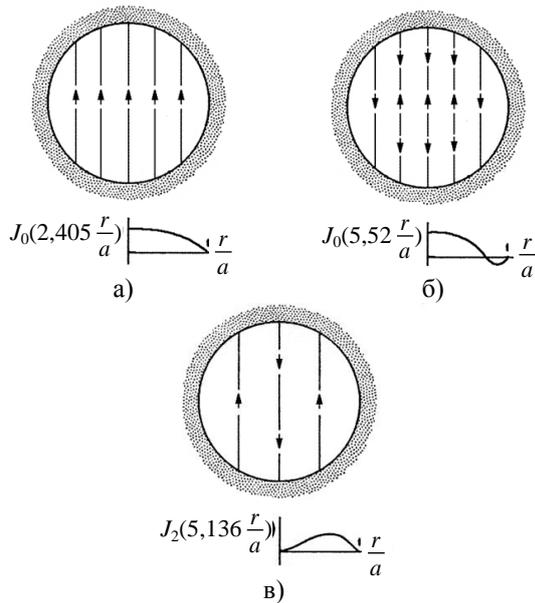


Рис. 1. Линии электрического поля основных гибридных мод  $HE_{11}$  (а),  $HE_{12}$  (б) и комбинированной гибридной моды  $HE_{-11+31}$  (в)

Наличие в волноводе побочных мод приводит к ошибкам в измерениях, искажениям диаграммы направленности излучения из волновода и т. д.

Затухание побочных мод  $HE_{12}$  и  $HE_{-11+31}$  в ПДВ незначительно превышает затухание

рабочей моды  $HE_{11}$ . Это обусловлено тем, что коэффициент затухания  $\alpha_{nm}$  гибридных мод  $HE_{nm}$  в ПДВ определяется выражением [1]

$$\alpha_{nm} = \left( \frac{U_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{a^3} \operatorname{Re} \frac{1/2(\varepsilon - 1)}{\sqrt{\varepsilon - 1}}, \quad (1)$$

где  $U_{nm}$  –  $m$ -й корень уравнения  $J_{n-1}(U_{nm}) = 0$ ;  $J_{n-1}$  – функция Бесселя;  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $a$  – радиус волновода;  $\operatorname{Re}$  – действительная часть;  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$  – комплексная диэлектрическая проницаемость стенки волновода.

Порядок величины коэффициента затухания определяется сомножителем  $\lambda^2/a^3$ , который для квазиоптических волноводов много меньше 1. Разнятся коэффициенты затухания гибридных мод сомножителями  $\left( \frac{U_{nm}}{2\pi} \right)^2$ , которые мало отличаются для рабочей моды  $HE_{11}(U_{11} = 2,405)$  и для побочных мод  $HE_{12}(U_{12} = 5,52)$ ,  $HE_{-11+31}(U_{31} = 5,136)$ . Для значительного подавления побочных мод за счет самофильтрации волновода потребуется прямолнейный регулярный участок последнего большой длины, поэтому возникает необходимость в устройстве, которое решало бы эту задачу при малой длине волновода.

Как правило, все три моды ( $HE_{11}$ ,  $HE_{12}$ ,  $HE_{-11+31}$ ) поляризованы в одной плоскости. Если побочные моды возникнут с ориентацией вектора  $\vec{E}$  в плоскости, ортогональной к плоскости поляризации рабочей моды, их легко устранить из волновода с помощью, например, одномерной проволочной решетки, проволочки которой параллельны вектору  $\vec{E}$ .

В многомодовых металлических волноводах для устранения побочных мод широко

применяются методы создания в стенке волновода щелей, пересекающих линии тока побочных мод и не влияющих на рабочую моду. Для решения нашей задачи такие методы не подходят.

Исследуем возможность подавления указанных побочных мод на 15...20 дБ, используя различие фазовых скоростей мод в волноводе. С этой целью рассмотрим резонатор, образованный отрезком волновода, который ограничен двумя плоскими одномерными проволочными решетками, плоскости которых параллельны друг другу, а проволочки ориентированы вдоль плоскости поляризации вектора  $E$  моды и перпендикулярны к оси волновода.

Коэффициент прохождения СВЧ-мощности через резонатор в момент резонанса, как известно [6], равен

$$T_{\text{рез}} = 4Q_{\text{н}}^2 / Q_{\text{св}}^2, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{н}}$  – нагруженная добротность резонатора;  $Q_{\text{св}}$  – добротность связи. Для исследуемого резонатора аналитические выражения для этих добротностей имеют следующий вид

$$Q_{\text{н}} = \pi q \frac{(\frac{\lambda_{nm}}{\lambda})^2}{(e^{\alpha_{nm} q \lambda_{nm}} - 1) + T + A}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{св}} = 2\pi \frac{q}{T} (\frac{\lambda_{nm}}{\lambda})^2, \quad (4)$$

где  $\lambda_{nm}$  – длина волны в волноводе;  $q$  – число полуволн  $\lambda_{nm}/2$ , укладываемых на длине резонатора;  $T$  – коэффициент прохождения одиночной решетки;  $A$  – коэффициент затухания в проволочках решетки;  $e^{\alpha_{nm} q \lambda_{nm}} - 1$  – затухание в стенках волновода на длине резонатора. Необходимость учета затухания в стенках волновода обусловлена тем, что при длине резонатора  $(100-200)\lambda_{nm}$  оно становится соизмеримым с затуханием в проволочках решетки.

Для резонатора, выполненного на основе ПДВ, коэффициент прохождения по мощности через резонатор моды  $HE_{nm}$  при резонансе, с учетом затухания в стенках волновода, приобретает вид

$$T_{\text{рез}} = \frac{T^2}{\left[ (e^{\alpha_{nm} q \lambda_{nm}} - 1) + T + A \right]^2}. \quad (5)$$

При произвольной длине резонатора  $\delta$  коэффициент прохождения по мощности  $T_{(\delta, nm)}$  моды  $HE_{nm}$  с учетом ее коэффициента затухания  $\alpha_{nm}$  определяется выражением

$$T_{(\delta, nm)} = \frac{T^2 e^{-2\delta \alpha_{nm}}}{(1 - \text{Re}^{-2\delta \alpha_{nm}})^2 + 4 \text{Re}^{-2\delta \alpha_{nm}} \sin^2[\delta \beta_{nm} - (\varphi - \pi)]}, \quad (6)$$

где  $R^{1/2} e^{i\varphi}$  – комплексная амплитуда коэффициента отражения одиночной решетки;  $\varphi$  – фаза волны при отражении от решетки;  $T$  – коэффициент прохождения одиночной решетки;  $\beta_{nm}$  – фазовая постоянная моды  $HE_{nm}$ .

Прохождение СВЧ-энергии через резонатор  $T_{(\delta, nm)}$  максимально при длине резонатора

$$\delta_{\text{max}} = \frac{\lambda_{nm}}{2} \left( q + \frac{\varphi - \pi}{\pi} \right), \quad (7)$$

где  $\lambda_{nm}$  – длина волны моды  $HE_{nm}$  в волноводе;  $q$  – число полуволн  $\lambda_{nm}/2$  на длине резонатора.

Минимальное прохождение  $T_{(\delta, nm)}$  наблюдается при длине резонатора

$$\delta_{\text{min}} = \frac{\lambda_{nm}}{4} \left[ (2q - 1) + \frac{2(\varphi - \pi)}{\pi} \right]. \quad (8)$$

Относительное подавление (развязка)  $\chi_{\text{max}}$  побочной моды  $HE_{nm}$  против уровня рабочей моды  $HE_{11}$  будет максимальным, когда длина резонатора будет одновременно соответствовать условию (7) для  $HE_{11}$  и условию (8) для  $HE_{nm}$ :

$$\chi_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}(\delta, 11)}}{T_{\text{min}(\delta, nm)}} = e^{2\delta(\alpha_{nm} - \alpha_{11})} \times \left[ \frac{1 + \text{Re}^{-2\delta \alpha_{nm}}}{1 - \text{Re}^{-2\delta \alpha_{11}}} \right]^2. \quad (9)$$

Коэффициенты  $T$  и  $R$  решеток для рабочей и указанных побочных мод одинаковы. Первый множитель в (9) определяется самофильтрацией волновода, а второй – резонансными свойствами фильтра.

Коэффициент прохождения  $T$  одномерной решетки с шагом  $g$ , много меньшим длины рабочей волны  $\lambda$ , образованной проволочками диаметром  $2b$ , при параллельно поляризованном облучении и  $g/b \geq 8$  в резонаторе интерферометра Фабри-Перо исследовался в работе [7]. В субмм диапазоне отношение  $g/b$  может быть близким к пределу применимости соотношений, поэтому воспользуемся исходным выражением для  $T$

$$T = 1 - R = \sin^2 \phi, \quad (10)$$

где  $\phi = \pi - \arctg 2wg/\lambda$ ;  $w = \ln(g/2\pi b)$ .

Коэффициент затухания  $A$  в проволочках одномерной решетки определяется выражением [7]

$$A = \frac{g}{\pi b} R \left( \frac{c}{\sigma \lambda} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – проводимость материала проволочек;  $c$  – скорость света;  $R$  – коэффициент отражения решетки.

Расчетные параметры решетки из вольфрамовых проволочек диаметром  $2b = 20 \mu$  с шагом

$g = 200\mu$  на волне  $\lambda = 1$  мм составили:  $T = 0,2147$ ,  $R = 0,7786$  и  $A = 0,0067$ . Экспериментально измеренный коэффициент прохождения  $T$  на волне  $\lambda = 0,986$  мм равен  $0,205$ . Снижение его против расчетного можно объяснить остатками поглощающего покрытия на проволочках из вольфрама. Разность измеренного и вычисленного  $T$  следует отнести на увеличение  $A$  до  $0,017$ .

Следует отметить, что расчеты коэффициента прохождения решетки  $T$  по формулам Вайнштейна [8] дали хорошее совпадение с полученными по формулам [7]: амплитуды – с точностью до  $0,1\%$ , фазы при отражении – до  $2,5\%$ .

Экспериментальные исследования проведены на макете фильтра, который обеспечивает возможность ступенчатого и плавного изменения длины резонатора. Одна из решеток закреплена перпендикулярно оси волновода на подвижном цилиндре, соединенном с механизмом отсчета величины перемещения. Механизм юстировки положения второй решетки относительно первой позволяет обеспечить параллельность их плоскостей и осей проволочек.

На рис. 2 представлены результаты экспериментально измеренных коэффициентов прохождения СВЧ-мощности рабочей моды  $HE_{11}$  и побочных  $HE_{12}$  и  $HE_{-11+31}$  через резонатор при резонансе и расчетные значения для моды  $HE_{11}$  (при резонансе) в функции длины резонатора на волне  $\lambda = 0,986$  мм в ПДВ диаметром  $20$  мм.

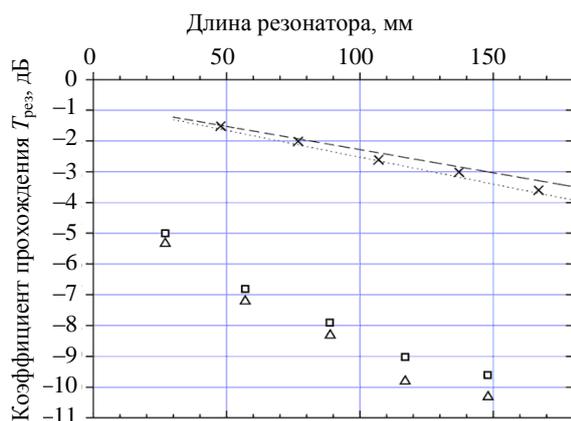


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения через резонатор при резонансе от длины резонатора:  $\cdots$  – расчет для моды  $HE_{11}$  по (6);  $---$  – по (5); эксперимент:  $\times$  – мода  $HE_{11}$ ;  $\Delta$  – мода  $HE_{12}$ ;  $\square$  – мода  $HE_{-11+31}$

При расчетах использовались экспериментально уточненные значения параметров решетки:  $T = 0,205$ ,  $A = 0,017$  и затухания моды  $HE_{11}$   $\alpha_{11} = 2,3017 \cdot 10^{-3}$  дБ/мм, против расчетного значения равного  $\alpha_{11} = 1,8414 \cdot 10^{-3}$  дБ/мм. Увеличение затухания связано с наличием разрывов волновода в местах размещения решеток.

Расчеты по формулам (5) и (6) дают близкие результаты. Экспериментально измеренные значения коэффициента прохождения моды  $HE_{11}$  хорошо согласуются с расчетом. Большие значения  $T_{рез}$  для рабочей моды  $HE_{11}$  (малые потери) открывают перспективы для создания эффективного фильтра.

Экспериментальные результаты исследования селективных свойств резонатора на базе отрезка ПДВ представлены на рис. 3

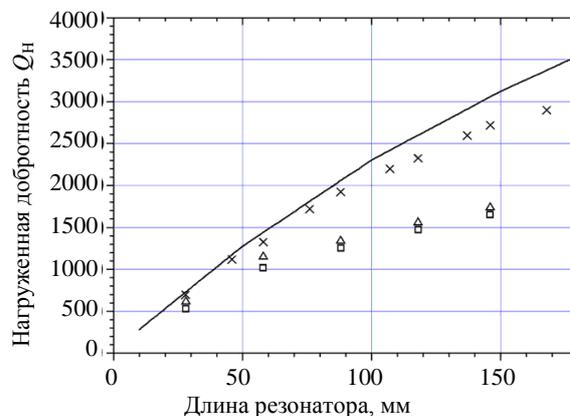


Рис. 3. Зависимость нагруженной добротности резонатора от длины резонатора:  $—$  – расчет по (3) для моды  $HE_{11}$ ; эксперимент:  $\times$  – мода  $HE_{11}$ ;  $\Delta$  – мода  $HE_{12}$ ;  $\square$  – мода  $HE_{-11+31}$

Экспериментальные измерения нагруженной добротности подтверждают наличие у такого резонатора достаточно высоких значений добротности не только для рабочей моды  $HE_{11}$ , но и для побочных мод  $HE_{12}$  и  $HE_{-11+31}$ .

При экспериментальном исследовании относительного подавления  $\chi$  побочной моды  $HE_{nm}$  резонатор настраивался на максимальное прохождение рабочей моды  $HE_{11}$ . Затем на резонатор подавался большой уровень побочной моды. Величина  $\chi$  определялась как разность затухания побочной и рабочей моды в децибелах. Результаты измерений представлены на рис. 4. Расчетные кривые для  $\chi$  получены с помощью выражения (9).

Результаты экспериментальных измерений свидетельствуют о возможности реализовать относительное подавление побочных мод на  $15...20$  дБ. Разрывы волновода в резонаторе при малых длинах резонатора приводят к более сильному росту потерь побочных модов и к экспериментальным значениям развязки выше расчетных. При увеличении длины резонатора добротность резонатора для побочных мод падает быстрее, чем у рабочей моды, и относительное подавление побочных мод снижается против расчетной величины.

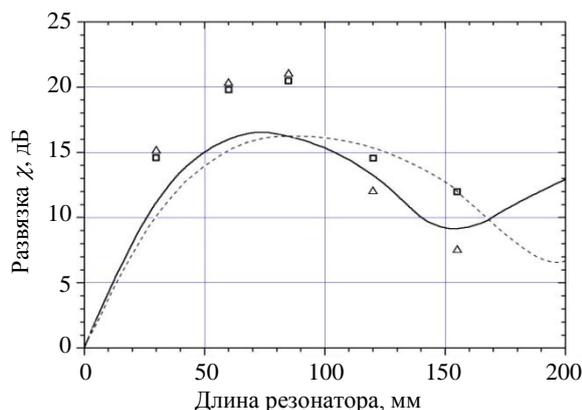


Рис. 4. Относительное подавление побочной моды  $\chi$  в зависимости от длины резонатора. Расчет: — — мода  $HE_{12}$ ; - - - мода  $HE_{-11+31}$ ; эксперимент:  $\Delta$  — мода  $HE_{12}$ ;  $\square$  — мода  $HE_{-11+31}$

На практике при корректном возбуждении рабочей моды и принятии практических мер по снижению неоднородностей в волноводе уровень возбуждения побочных мод может составлять единицы процентов и можно ограничиться существенно меньшим значением уровня подавления побочных мод. Если снизить требуемый уровень подавления побочных мод до 10 дБ, то воспользовавшись решетками с параметрами  $2b = 20\mu$ ,  $g = 300\mu$  в волноводе диаметром 20 мм на волне  $\lambda = 1$  мм, можно уменьшить затухание рабочей моды до 0,8 дБ.

Исследование диапазонных свойств фильтра проводилось в диапазоне длин волн 0,8...1,2 мм. На рис. 5 представлены  $\chi_{\max}$  — максимальные измеренные значения относительного подавления побочных мод  $HE_{12}$  и  $HE_{-11+31}$ , против затухания рабочей моды  $HE_{11}$ .

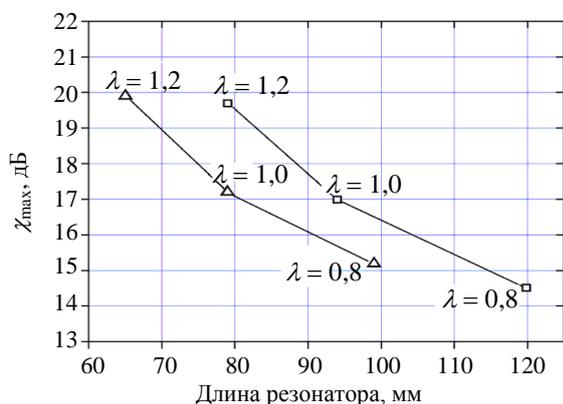


Рис. 5. Диапазонные свойства фильтра. Эксперимент:  $\Delta$  — мода  $HE_{12}$ ;  $\square$  — мода  $HE_{-11+31}$

**Выводы.** Проведенные исследования показывают, что проходной резонатор, образованный двумя одномерными проволочными решетками, ограничивающими отрезок регулярного ПДВ, позволяет обеспечить относительное подавление побочных мод  $HE_{12}$  и  $HE_{-11+31}$  на

15...20 дБ, при затухании рабочей моды  $HE_{11}$ , не превышающем 3 дБ.

1. Marcatili E. A. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers / E. A. Marcatili, R. A. Schmeltzer // The Bell System Technical Journal. — 1964. — 43, N 4. — P. 1783–1809.
2. Snitzer E. Cylindrical dielectric waveguide modes / E. Snitzer // J. Opt. Soc. Am. — 1961. — 51, N 5. — P. 491–498.
3. Горошко А. И. Исследование полого диэлектрического лучевода миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / А. И. Горошко, Е. М. Кулешов // Радиотехника: науч.-техн. сб. / Харьков. гос. ун-т. — X., 1972. — Вып. 21. — С. 215–219.
4. А. с. 302054 СССР, МПК Н 01 3/00. Диэлектрический лучевод субмиллиметрового диапазона волн / А. Н. Ахиезер, А. И. Горошко, Б. Н. Князьков и др. — № 1380503/26-9; заявл. 28.11.1969; опубл. 3.02.71, Бюл. № 8. — 1972. — 12 с.
5. Киселев В. К. Физическое моделирование электромагнитного рассеяния в квазиоптических направляющих структурах терагерцевого диапазона / В. К. Киселев // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. — X., 2008. — 13, спец. вып. — С. 359–376.
6. Альтман Дж. Устройства СВЧ / Дж. Альтман; пер. с англ. под ред. И. В. Лебедева. — М.: Мир, 1968. — 487 с.
7. Ulrich R. Tunable submillimeter interferometers of the Fabry-Perot type / R. Ulrich, K. F. Renk, L. Genzel // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 1963. — MTT-11, N 5. — P. 363–371.
8. Вайнштейн Л. А. К электродинамической теории решеток / Л. А. Вайнштейн // Электроника больших мощностей. — № 2. — 1963. — С. 26–56.

A. I. Goroshko, V. K. Kiseliiov

#### SUBMILLIMETRIC-WAVE RANGE REJECTION FILTER OF LATERAL HYBRID MODES IN HOLLOW DIELECTRIC WAVEGUIDE

The breadboard modes of a rejection a circular hollow dielectric waveguide has been analyzed and experimentally studied. The filter is a waveguide segment bounded by two planar one-dimensional wire grating. This type of filter suppresses spurious modes down to 15...20 dB, us the operating  $HE_{11}$  mode gets damped down to 3 dB at 300 GHz in a waveguide of diameter 20 mm.

**Key words:** submillimetric-wave range, hollow dielectric waveguide, hybrid-mode suppression.

A. I. Горошко, В. К. Кисельов

#### ЗАГОРОДЖУЮЧИЙ ФІЛЬТР ПОБІЧНИХ ГІБРИДНИХ МОД ПОРОЖНИСТОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ХВИЛЕВОДУ СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Проведено аналіз та експериментальне дослідження макета загороджуючого фільтра гібридних мод  $HE_{12}$  і  $HE_{-11+31}$  в круглому порожнистому діелектричному хвилеводі. Фільтр утворений відрізком хвилевода, обмеженим двома плоскими одновимірними дрютяними решітками. Фільтр дозволяє забезпечити заглушення побічних мод до 15...20 дБ при затуханні робочої моди  $HE_{11}$  до 3 дБ на частоті 300 ГГц у хвилеводі діаметром 20 мм.

**Ключові слова:** субміліметровий діапазон довжин хвиль, порожнистий діелектричний хвилевод, заглушення гібридних мод.

Рукопись поступила 07.12.10 г.