

09;12

Квазиоптический резонаторный диплексер с универсальными поляризационными характеристиками

© С.Н. Власов,¹ Е.В. Копосова,¹ Ю.И. Кошуринов,¹ Л.В. Лубяко,¹ В.Г. Павельев,¹ W. Kasperek,² H. Höhnle²

¹ Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия

² Universität Stuttgart, IPF,
70569 Stuttgart, Deutschland
e-mail: lub@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 18 октября 2011 г.)

Построена теория диплексера, способного работать при произвольной поляризации волнового потока. Модельный эксперимент на частоте 34 GHz осуществлен в хорошем согласии с теорией. Диплексеры данного типа предложены для использования в экспериментах по программе УТС.

Введение

Резонаторный диплексер [1–3] был предложен для управления волновыми потоками мощного миллиметрового излучения. Он позволяет складывать (или разделять) 2 потока разночастотного излучения. Основой устройства (рис. 1) является высокодобротный четырехзеркальный резонатор бегущей волны, связанный с двумя линиями передачи. Связь обеспечивается за счет дифракции на гофрированных зеркалах, общих для линий и резонатора. Период гофры D подобран так, чтобы при отражении волны от зеркала имели место только 2 лепестка — зеркальный, в который идет ~ 0.9 мощности волны, падающей на решетку, и -1 -й дифракционный, в который идет ~ 0.1 мощности волны. На входном зеркале связи (рис. 1) -1 -й лепесток направляется в резонатор, а зеркальный поступает на нерезо-

нансный выход. На выходном зеркале связи зеркальный лепесток направляется в резонатор, а -1 -й лепесток образует резонансный выход. На резонансных частотах при одинаковых параметрах зеркал связи резонатор полностью прозрачен.

На любом из выходов можно сложить два потока излучения, один из которых имеет резонансную, а другой нерезонансную частоты. Изменением частот сигналов можно добиться переключения выхода, на который поступает суммарное излучение. Особенно ценно, что путем частотной модуляции гиротрона это можно делать достаточно быстро. Проведенные в Max-Planck IPP (Грайфсвальд, Германия) испытания [3–5] продемонстрировали возможность суммирования двух потоков линейно поляризованного излучения 140 GHz с суммарной мощностью, близкой к 1 MW, и последующей коммутации с выходов с частотой до 10 kHz. Этот диплексер мог функционировать только на волнах с фиксированной линейной поляризацией. В системах нагрева и управления свойствами плазмы используются волны с различной поляризацией. Поэтому представляет интерес создание диплексера, функционирующего при произвольной поляризации волн.

В настоящей работе исследуется возможность создания такого диплексера — диплексера с универсальными поляризационными характеристиками. Для этого предлагается использовать зеркала связи с более сложным профилем гофра. Предполагается, что такая универсальность позволит упростить и удешевить конструкцию системы ЭЦ нагрева в установках УТС.

1. Теория диплексера с универсальными поляризационными характеристиками

Универсальный профиль был синтезирован и представлен в [7]. В настоящей работе ограничимся кратким изложением основных теоретических сведений для по-

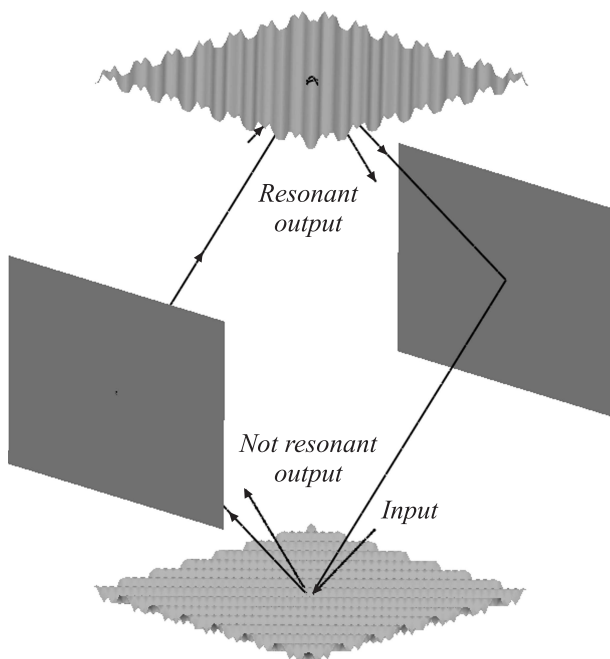


Рис. 1. Резонатор диплексера.

нимания действия резонаторного диплексера с универсальными поляризационными характеристиками.

Найдем в приближении геометрической оптики (т.е. без учета дифракции, вызванной конечной шириной пучка электромагнитных волн в диплексере) собственные частоты резонатора с учетом векторного характера полей и определим условия, при выполнении которых функционирование диплексера возможно независимо от поляризации. Рассмотрим случай, когда направления гофрировки на противоположных зеркалах перпендикулярны друг другу. Отметим, что при отражении от гладкого (не гофрированного) зеркала из металла без потерь вектор электрического поля изменяется. Это является следствием различия коэффициентов отражения падающих на зеркало волн с вектором поля **H**, перпендикулярным плоскости падения (и вектором **E** в этой плоскости), и волн с вектором **E**, перпендикулярным плоскости падения. При отсутствии омических потерь в зеркалах коэффициент отражения для волн первого типа $R_{\parallel} = 1$, и для волн второго типа $R_{\perp} = -1$. Учитывая, что волна при обходе резонатора дважды отражается от гофрированных зеркал с коэффициентом отражения R_E или R_H , для определения собственных частот получим следующее уравнение:

$$[R_H^2 \exp(-ikL) - 1][R_E^2 \exp(-ikL) - 1] = 0, \quad (1)$$

где L — длина контура обхода волны в резонаторе. Собственные частоты

$$k_{E,H} = k'_{E,H} + ik''_{E,H},$$

E - и H -мод резонатора диплексера определяются из выражения (1) посредством формул:

$$k'_{E,H} = \frac{1}{2L} [\pi q_{E,H} + p_{E,H}], \quad k''_{E,H} = -\frac{\ln |R_{E,H}|}{2L}, \quad (2)$$

где $q_{E,H}$ — целые числа, $p_{E,H}$ — фазы коэффициентов отражения, $R_{E,H} = |R_{E,H}| \exp[ip_{E,H}]$.

Диплексер будет функционировать на произвольной поляризации в том случае, когда собственные частоты E - и H -мод совпадают, и моды его являются вырожденными. Из равенств (2) следует, что частоты E - и H -мод резонатора совпадают при выполнении условий

$$p_E - p_H = \pi(q_H - q_E), \quad |R_E| = |R_H|, \quad (3)$$

т.е. при разности фаз коэффициентов $R_{E,H}$, кратной π , и равенстве их модулей. При выполнении этих условий поля собственных колебаний на гофрированных зеркалах могут иметь произвольную поляризацию. Способ синтеза профиля, удовлетворяющего условию (3), будет описан в отдельной работе. Исследование задачи о дифракции на гофрированной поверхности [8] показало, что существует множество профилей, удовлетворяющих условию (3). Основное требование к таким профилям — это достаточное количество параметров в их описании,

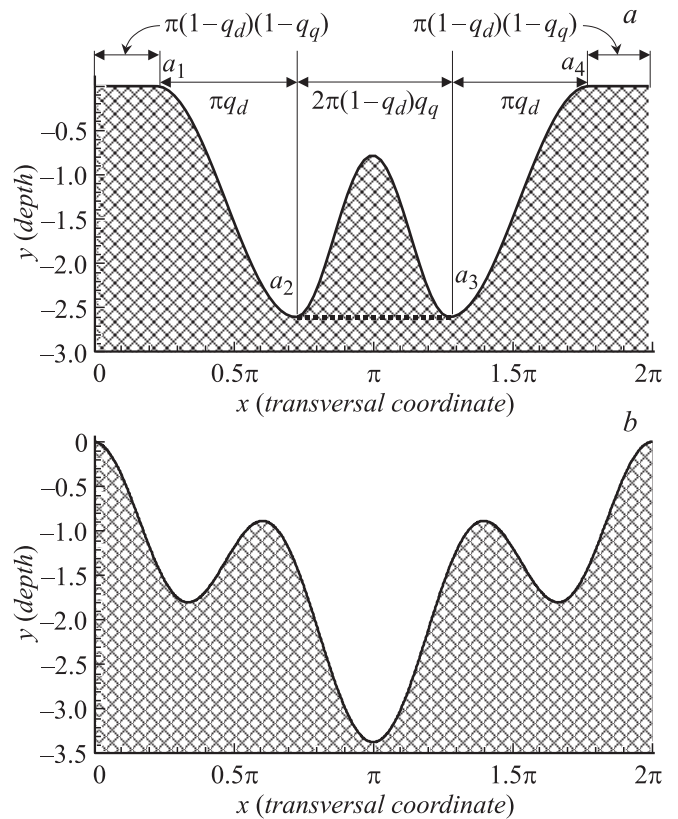


Рис. 2. Профиль гофра, обеспечивающий равенство как модулей коэффициентов отражения для E - и H -поляризаций (на уровне ~ 0.9), так и их фаз: a — с представлением параметров описания периода профиля; b — с сохранением разницы в π раз в нулевом порядке (как от гладкой металлической плоскости).

варьированием которых достигается необходимое условие. В частности, условию равенства фаз

$$p_E = p_H \quad (4)$$

удовлетворяет профиль, изображенный на рис. 2, a , а условию отличия фаз на π

$$p_E = p_H - \pi \quad (5)$$

удовлетворяет профиль, изображенный на рис. 2, b . Масштаб по осям абсцисс и ординат на рис. 2 одинаков. Для экспериментальных исследований был выбран профиль рис. 2, a .

Профиль состоит из пяти частей: на участках I ($x \leq a_1$) и V ($x \geq a$) он описывается прямой $y(x) = 0$, на участках II ($a_1 \leq x \leq a_2$) и IV ($a_3 \leq x \leq a_4$) описывается синусоидой

$$y(x) = A \left[\cos\left(\frac{x - a_1}{q_d}\right) - 1 \right]$$

с амплитудой A , на участке III ($a_2 \leq x \leq a_3$) описывается синусоидой

$$A \left\{ \tilde{A} \left[1 - \cos\left(\frac{x - a_2}{1 - [q_d + (1 - q_d)(1 - q_q)]}\right) \right] - 2 \right\}$$

с относительной амплитудой \tilde{A} .

Сшивание на границах интервалов производится до первых производных включительно (требование сходимости решения интегрального уравнения) в 4 точках на периоде:

$$a_1 = \pi(1 - q_d)(1 - q_q), \quad a_2 = \pi[q_d + (1 - q_d)(1 - q_q)],$$

$$a_3 = \pi\{2 - [q_d + (1 - q_d)(1 - q_q)]\},$$

$$a_4 = \pi[2 - (1 - q_d)(1 - q_q)]. \quad (6)$$

Функция, описывающая профиль, имеет параметры $q_d = (a_1 - a_2)/2\pi$, характеризующие часть периода, занимаемого 1-й синусоидой, и $q_q = (a_3 - a_2)/2\pi$, характеризующие часть периода, занимаемого 2-й синусоидой. Параметров q_d, q_q и амплитуд A, \tilde{A} , оказывается достаточным для достижения выполнения условий (3).

Возможность выполнения равенства фаз при отражении излучения разных поляризаций от такого профиля очевидна из физических соображений: E -мода в основном отражается от больших гребней (горбов), H -мода в основном отражается от малых гребней — перегородок в канавке.

Следующие значения $q_d = 0.5$, $q_q = 0.55$, $A = 1.29$, $\tilde{A} = 0.7$ параметров профиля обеспечивают равенство коэффициентов отражения для E - и H -поляризаций на уровне значений модуля коэффициентов отражения $|R_E| = |R_H| = 0.89$, необходимом для разделения резонансных кривых разных продольных порядков $q_E = p_E = q_H = p_H$, при этом:

$$\arg R_E = 2.42 \approx \arg R_H = 2.40. \quad (7)$$

При определенных выше углах падения волн период D оказывается равным длине волны λ падающего излучения $D = \lambda$, а амплитуды равны соответственно $A = 1.29\lambda/2\pi$ и $\tilde{A} = 0.7$. Внешний вид зеркала связи приведен на рис. 3.

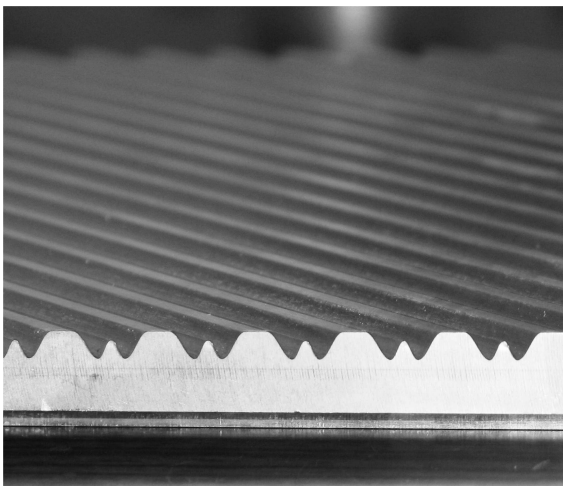


Рис. 3. Зеркало связи с профилем OPG.

Профиль, изображенный на рис. 2, b , описывается следующим рядом Фурье из 5 гармоник в разложении

$$y = \sum_{j=0}^4 A_j \cos jx.$$

Коэффициенты A_j приведены в таблице.

j	0	1	2	3	4
A_j	-1.508	0.435	-0.124	0.411	0.033

2. Экспериментальное исследование резонаторного диплексера с универсальными поляризационными характеристиками

Модельный эксперимент ставился с тем, чтобы показать возможность создания диплексера, универсального по отношению к поляризации поступающего излучения. Исследования проводились на макете резонаторного диплексера 34 GHz, в котором использовались зеркала связи с синтезированным профилем гофры, обеспечивающим независимость коэффициентов передачи диплексера от поляризации падающего излучения. Установка включает в себя (рис. 4): четырехзеркальный, кольцевой резонатор бегущей волны с длиной оптического пути $L \approx 807$ mm, зеркала 1–4 и рупор 5 для подключения к линии передач, свипируемый по частоте источник сигнала (Гд), а также детекторы, снабженные калиброванными аттенюаторами. Сигналы с выходов детекторов

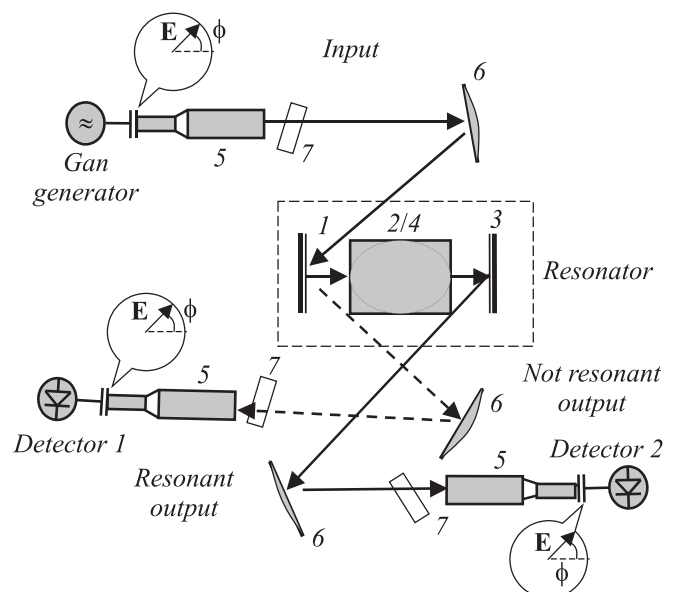


Рис. 4. Блок-схема стенда 34 GHz.

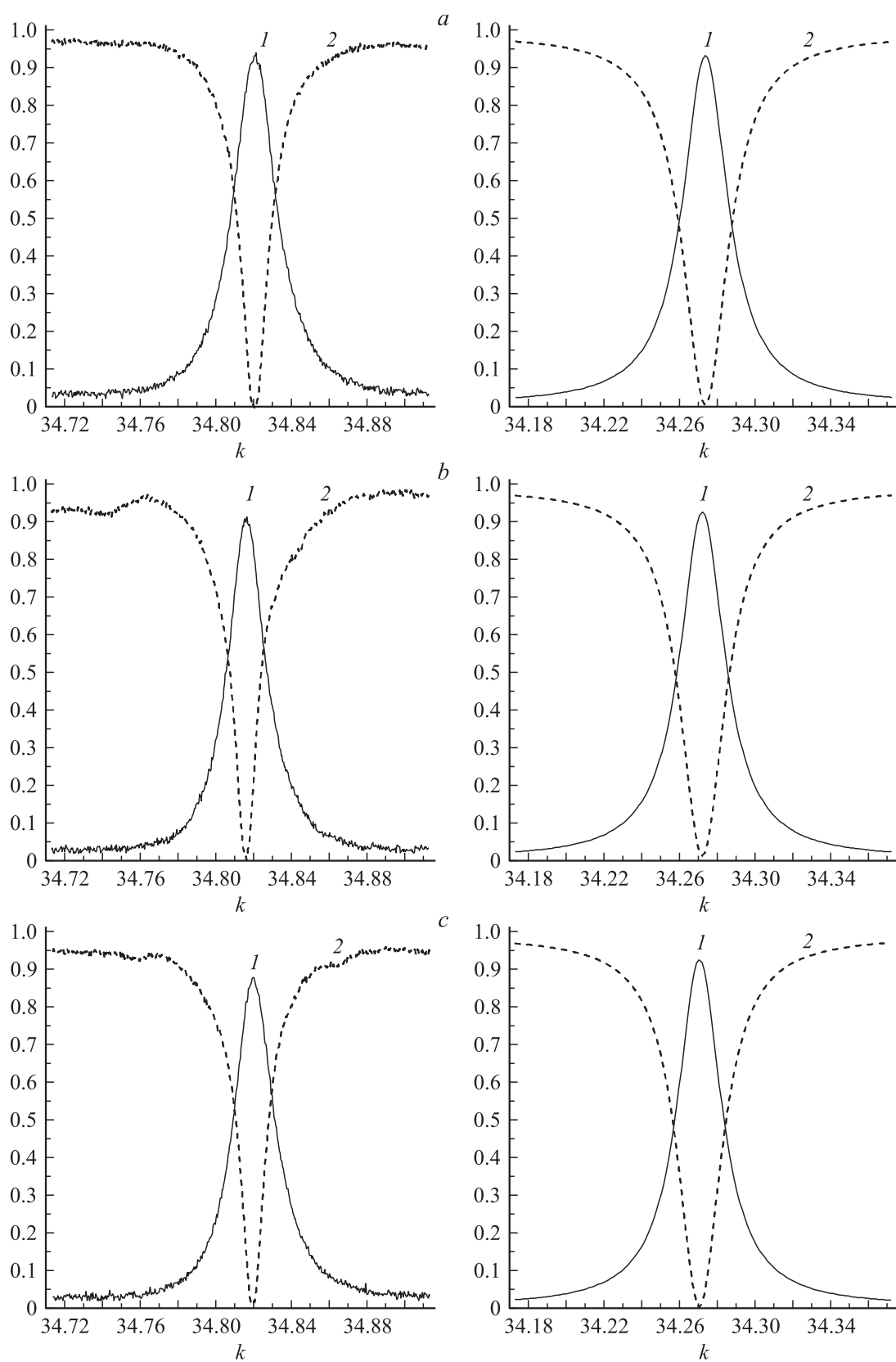


Рис. 5. Коэффициенты передачи диплексера по мощности в зависимости от частоты для различных поляризаций падающего излучения (1 — резонансный канал, 2 — нерезонансный канал, a — $\varphi = 0^\circ$; b — $\varphi = 45^\circ$; c — $\varphi = 90^\circ$). Частота резонанса 34.82 GHz.

индицируются на экране двухканального осциллографа. Выбор параметров зеркал и рупоров обеспечивает преобразование основной волноводной моды H_{01} в гауссов пучок с линейной поляризацией [1].

Источник сигнала 34 GHz — генератор Гана с электронной перестройкой частоты. Чтобы наблюдать частотную зависимость коэффициентов передачи резонансного и нерезонансного каналов диплексера на экране осциллографа, частота генератора свипировалась в полосе 100 MHz, центрированной к одной из резонансных частот резонатора. Перестройка имевшегося в нашем распоряжении генератора Гана позволяла наблюдать несколько продольных мод, отстоящих на ~ 370 MHz друг от друга.

Для изменения поляризации входного и анализа поляризации принимаемого излучений все три рупора имели возможность поворота относительно продольной оси. Для отсчета углов установлены шкалы. Поворотом входного рупора устанавливается поляризация моды, возбуждаемой в резонаторе. Положение $\phi = 0$ соответствует тому, что проекция электрического вектора \mathbf{E} на плоскость гофрированного зеркала в возбуждающем и приемном рупорах параллельна гофрам (E -мода). $\phi = 90^\circ$ соответствует H -моду, а $\phi = 45^\circ$ соответствует тому, что направление вектора \mathbf{E} в возбуждающем и приемном рупорах направлено под углом $\phi = 45^\circ$ к направлению ребер гофра. Поляризация излучения как в резонансном, так и в нерезонансном каналах остается линейной. Поворотом приемных рупоров изменялась принимаемая поляризация. Чтобы избежать влияния кросс-поляризации, когда поляризации излучателя и приемника не согласованы, каждый из рупоров снабжен поляризационным фильтром. Фильтры выполнены в виде линейных проволочных сеточек, ориентированных поперек вектора электрического поля и установленных под углом, чтобы волна с кросс-поляризацией не давала паразитных резонансов.

Измерениям предшествовали калибровка и юстировка. Определялся уровень сигнала „без потерь“. Гофрированное зеркало I заменялось плоским, при этом потери можно было считать пренебрежимо малыми, и фиксировался уровень принимаемого сигнала, относительно которого отсчитывались измеряемые величины. Кроме того, с помощью аттенуаторов выравнивались чувствительности обоих каналов. Юстировка сводилась к поиску области частот, где выполняется равенство (3). Критерием для настройки являлось отсутствие расщепления T - и H -мод при минимальных потерях в исследуемом диапазоне частот. В нашем случае мода резонатора с минимальным расщеплением имела частоту 34.8 GHz, что несколько выше расчетной.

Для иллюстрации результатов на рис. 5 показаны экспериментальные (левая колонка) и рассчитанные (правая колонка) зависимости коэффициента передачи диплексера от частоты на рабочей моде при трех разных углах $\phi = 0, 45, 90^\circ$, соответствующих возбуждению a — E -моды, b — обеих E - и H -мод и c —

H -моды. Резонансная частота 34.82 GHz. Ширина резонансной кривой на уровне 3 dB составляет 30 MHz. Расчеты проводились с учетом дифракции и потерь, вызванных конечным размером зеркал. Метод расчета будет опубликован в отдельной работе.

На приведенных рисунках коэффициент передачи резонансного канала при изменении поляризации от E - к H -моду меняется практически от 0.99 до 0.85. Коэффициент передачи нерезонансного канала составляет 0.92 и не зависит от поляризации. При юстировке по H -моду коэффициенты передачи изменялись в зависимости от поляризации в меньших пределах — от 0.87 до 0.94 в резонансном канале и 0.93 в нерезонансном.

Заключение

В настоящей работе показана возможность построения резонаторных диплексеров миллиметрового диапазона волн для работы при произвольной поляризации излучения. Проведенный модельный эксперимент подтвердил выводы теоретического рассмотрения модели диплексера. Зеркала, синтезированные с использованием созданных программ расчета, имеют требуемые характеристики. Резонаторный диплексер с такими зеркалами практически универсален по отношению к поляризации поступающего на него излучения.

При дальнейшей доработке (введении необходимых юстировок, снижении омических потерь в резонаторе и увеличении соотношения между поперечными размерами пучка и длиной волны), по-видимому, можно несколько улучшить характеристики. Полученные результаты представляют интерес при создании диплексера для использования в мощных системах электронно-циклотронного нагрева как средства управления мощными потоками миллиметрового излучения.

Отметим также, что характеристики диплексера с универсальными поляризационными зеркалами связи имеют существенные отличия от диплексера с линейно поляризованными модами [1]. Моды резонатора с универсальными поляризационными зеркалами являются вырожденными. Это вырождение снимается различными возмущающими факторами. Одним из главных является разная зависимость коэффициентов R_E и R_H от частоты. Последнее приводит к разному смещению [9] пучков E - и H -компонент мод при отражении от гофрированного зеркала и, как следствие, к расщеплению резонансного контура. Это обуславливает более узкую полосу функционирования диплексера с универсальными поляризационными характеристиками, в нашем случае ~ 400 MHz по сравнению с диплексером с линейной поляризацией.

Авторы благодарны М.И. Петелину за дискуссии.

Работа выполнена при поддержке гранта 047.018.002 Centre of Excellence, Nederland и Российского фонда фундаментальных исследований, грант 08-02-01233.

Список литературы

- [1] Кошуринов Ю.И., Павельев В.Г., Петелин М.И., Турчин И.В., Щегольков Д.Ю. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, Вып. 16. С. 73 -79.
- [2] Щегольков Д.Ю. Автореф. канд. дис. ИПФ РАН. Нижний Новгород, 2007.
- [3] Erckmann V., Kasparek W., Koshurinov Yu., Lubyako L., Petelin M.I., Shchegolkov D.Yu., Hollmann F., Michel G., Noke F., Purps F. // Fusion Sci. Technol. 2009. Vol. 55. N 1. P. 23–30.
- [4] Kasparek W., Petelin M., Erckmann V., Bruschi A., Noke F., Purps F., Hollmann F., Koshurinov Yu., Lubyako L., Plauml B., Wubiel W. // Fusion Engineering and Design. 2009. Vol. 84. P. 1002–1005.
- [5] Bruschi A., Erckmann V., Kasparek W., Petelin M., Thumm M., Bin W., Cirant S., D'Arcangelo O., Hollmann Frank, Lubyako L., Noke Frank, Plauml B., Purps Frank, Zohm H. // Special Issue of the IEEE Transactions on Plasma Science on High-Power Microwave Generation, June 2010. Vol. 38. N 6. P. 1427–1438.
- [6] Копосова Е.В. Петелин М.И. // Радиофизика. 1989. Т. 32. Вып. 9. С. 1178.
- [7] Vlasov S.N., Kuposova E.V. VII Int. Workshop Strong Microwaves: sources and applications, N. Novgorod, July 27–August 2, 2008.
- [8] *Electromagnetic theory of gratings* / Ed. by R. Petit. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980.