

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ПОЛЕЙ В ОТКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫМИ ЗЕРКАЛАМИ

В. С. Мирошниченко, В. Г. Дудка, Д. В. Юдинцев

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [mirosh@ire.kharkov.ua](mailto:mirosh@ire.kharkov.ua)*

Рассмотрены особенности использования трапецидальных зеркал для формирования протяженных полей в открытом резонаторе (ОР) терагерцевого диапазона. Приведены результаты численного моделирования свойств резонансных мод в двухмерном ОР с трапецидальными зеркалами. Установлена радиационная добротность и структура поля для  $E_{0q}$ -,  $E_{1q}$ - и  $E_{2q}$ -мод в ОР. Проведена оптимизация параметров трапецидальных зеркал для снижения радиационных потерь в ОР с протяженным полем. Рассмотрены особенности формирования нарастающих полей в ОР при повороте одного из трапецидальных зеркал. Проведено сравнение свойств мод в ОР с уголковыми зеркалами и трапецидальными зеркалами. Ил. 10. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** открытый резонатор, трапецидальное зеркало, уголковое зеркало, радиационные потери, омические потери, генератор дифракционного излучения.

Для ряда задач радиофизики в коротковолновой части мм диапазона существует проблема формирования протяженных полей в объеме открытого резонатора (ОР) и квазиоптических пучков с уплощенной вершиной. Так, для формирования поперечных мод с однородным профилем в волноводном квазиоптическом резонаторе лазера терагерцевого диапазона используются выпуклые зеркала либо зеркала асферической формы [1, 2]. Моды с супергауссовым профилем поля в ОР с зеркалами в виде «мексиканской шляпы» используются для повышения чувствительности интерферометрического детектора гравитационных волн [3, 4]. Однако для создания ОР с супергауссовыми полями необходимо развить специальные методы расчета и изготовления зеркал несферического профиля, к тому же изменяющегося при перестройке резонансной частоты ОР. Также в ОР с протяженным полем обычно происходит сближение частот соседних мод, что может привести к перекрытию резонансных кривых при увеличении омических потерь в терагерцевом диапазоне.

Серьезным препятствием при разработке генераторов дифракционного излучения (ГДИ) в терагерцевом диапазоне является проблема создания ОР, устойчивого к перекосу зеркал и формирующего пространство взаимодействия достаточной длины. Например, при использовании в ГДИ полусферического ОР радиус кривизны сферического зеркала должен составлять  $R_s > 1200\lambda$  при диаметре пятна поля на решетке  $2a_0 = 10\lambda$ , а минимальная апертура зеркал при малых радиационных потерях должна составлять  $2a = 4a_0 = 20\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны излучения в свободном пространстве). В качестве альтернативы для формирования протяженных полей на дифракционной решетке ранее использовались зеркала овального профиля [5]. Для уменьшения га-

баритов резонатора мы предлагаем вместо полусферических сегментов на краях зеркал использовать линейные скосы длиной  $\sim \lambda$ . В таком ОР с трапецидальными зеркалами формируются поперечные моды с малыми радиационными потерями и протяженным полем вдоль всей плоской части трапецидального зеркала [6].

В данной работе приведены результаты численного моделирования свойств колебаний в двухмерном ОР с трапецидальным зеркалом, полученные на основе строгого решения задачи теории дифракции на двухмерных гладких экранах произвольного сечения [7, 8].

**1. Двухмерный ОР с трапецидальными зеркалами.** Рассмотрим ОР, состоящий из двух трапецидальных зеркал в виде бесконечно тонких, идеально проводящих, незамкнутых цилиндрических экранов (рис. 1). Трапецидальные зеркала развернуты навстречу друг другу, имеют одинаковую форму и бесконечны вдоль оси  $OY$ . Пусть ширина плоской части  $L$  и параметры скосов зеркал  $b$  и  $\varphi$  будут одинаковы. Прямоугольные участки контуров зеркал соединены дугой с радиусом кривизны  $R \ll \lambda$ .

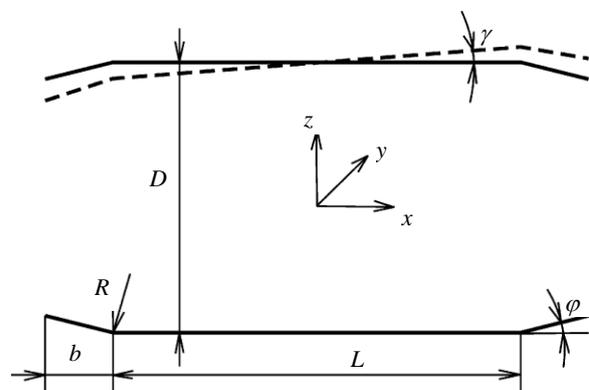


Рис. 1. ОР с трапецидальными зеркалами

Ранее другими авторами при помощи асимптотических методов были рассмотрены свойства мод в двухзеркальном ОР, состоящего из двух параллельных проводящих экранов [9], поверхностей в виде усеченных проводящих конусов [10], зеркал со скачком импеданса на краях апертуры [11]. Однако асимптотические методы позволяют только приблизительно установить свойства мод в ОР и лишь при определенных значениях параметров зеркал:  $D \gg 2a \gg \lambda$ . В настоящей работе мы использовали комплекс программ, разработанный в ИРЭ НАН Украины и позволяющий найти спектральный состав собственных колебаний и структуру поля в ОР с зеркалами в виде гладких проводящих экранов произвольной формы в широком диапазоне изменения параметров двумерных ОР [7, 8].

Собственные колебания в двумерном ОР с трапециевидными зеркалами (см. рис. 1) можно рассматривать как результат интерференции волноводных волн, отраженных от определенных участков на краях трапециевидных зеркал. Пусть резонансное поле в ОР с трапециевидными зеркалами представлено только одной электрической компонентой  $E_y$  (случай  $E$ -поляризации). Тогда по аналогии с классификацией мод в ОР, состоящего из двух цилиндрических зеркал, спектр поперечных мод будем обозначать как  $E_{mq}$ , где  $m+1$  – число полуволновых осцилляций поля вдоль плоской части трапециевидных зеркал (ось  $OX$ ),  $q$  – число полуволновых осцилляций поля, укладываемых между зеркалами резонатора (ось  $OZ$ ). Для примера, рассчитанная структура поля вдоль  $OX$  для первых трех мод  $E_{05}$ ,  $E_{15}$  и  $E_{25}$  представлена на рис. 2, параметры ОР составляли:  $L = 10\lambda$ ,  $b = \lambda$ ,  $\varphi = 5^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,  $D \approx 2,5\lambda$ .

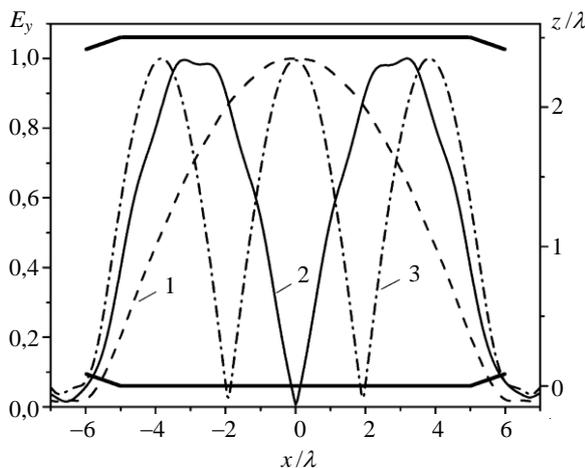


Рис. 2. Структура поля мод в плоскости симметрии двухмерного ОР с трапециевидными зеркалами: 1 –  $E_{05}$ ; 2 –  $E_{15}$ ; 3 –  $E_{25}$

Как видно из рис. 2, резонансное поле для основной  $E_{05}$ -моды занимает практически все поперечное сечение ОР и носит косинусоидальный характер с минимумом поля на склонах трапеции, т. е. с помощью трапециевидных зеркал возможно сформировать в ОР достаточно протяженные поля  $\sim 10\lambda$ . Для  $E_{15}$ -моды в поперечном сечении резонатора присутствуют два противофазных участка синусоиды с нулем электрического поля на оси резонатора (см. рис. 2, кривая 2).

Если ввести для характеристики энергетического распределения моды в поперечном сечении ОР коэффициент использования апертуры зеркал

$$\eta = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a E^2(x) dx, \quad (1)$$

то для резонатора с трапециевидными зеркалами он составит  $\eta = 0,5$  при апертуре  $2a = L + 2b$ , а для ОР, состоящего из двух цилиндрических зеркал, при апертуре  $2a = 4\omega_0$  ( $\omega_0$  – радиус гауссового пятна поля на зеркале ОР) коэффициент использования апертуры будет меньше в 1,6 раза:

$$\eta = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \exp(-2x^2/\omega_0^2) dx = 0,313. \quad (2)$$

**2. Оптимизация параметров ОР с трапециевидными зеркалами.** Для численного анализа был выбран ОР со следующими параметрами трапециевидных зеркал:  $L = 10\lambda$ ,  $b = \lambda$ ,  $R = 0,01\lambda$ ,  $\varphi = 5^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ . Проведем выбор оптимального межзеркального расстояния  $D \approx q\lambda/2$ . На фиксированной частоте радиационная добротность  $Q_{rad}$  для мод  $E_{0q}$ ,  $E_{1q}$  и  $E_{2q}$  монотонно снижается с увеличением продольного индекса  $q$  (рис. 3).

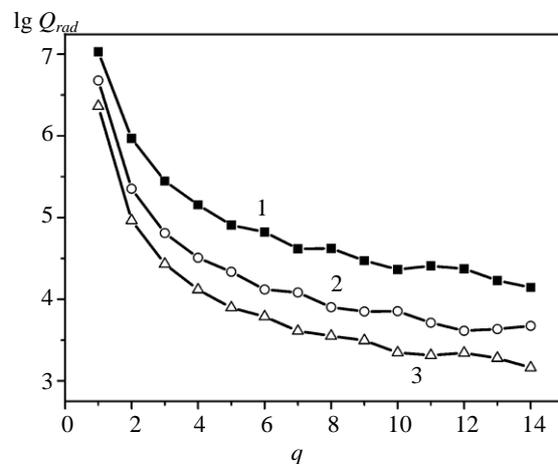


Рис. 3. Снижение добротности мод в ОР с увеличением продольного индекса  $q$  (межзеркального расстояния): 1 –  $E_{0q}$ ; 2 –  $E_{1q}$ ; 3 –  $E_{2q}$

Однако суммарная добротность мод определяется также и омическими потерями в зеркалах, вносящих существенный вклад в терагерцевом диапазоне. Выберем оптимальное расстояние между зеркалами ОР, рассчитанного на рабочую длину волны  $\lambda = 1$  мм, используя простейшую оценку омической добротности мод в ОР:

$$Q_{\Omega} = \frac{D}{2\delta}, \quad (3)$$

где  $\delta$  – толщина скин-слоя в металле зеркал. Тогда в ОР с трапециевидными зеркалами из меди поведение суммарной добротности мод ( $1/Q_{sum} = 1/Q_{rad} + 1/Q_{\Omega}$ ) характеризуется максимумом при продольном индексе  $q = 4 \div 8$ . Так, для основной моды  $E_{0q}$  максимальная добротность составляла  $Q_{sum} = 11892$  при  $q = 8$ , для моды  $E_{1q} - Q_{sum} = 7015$  при  $q = 5$ , а для  $E_{2q}$ -моды –  $Q_{sum} = 5082$  при  $q = 4$  (рис. 4). Поэтому оптимизацию других параметров трапециевидных зеркал будем проводить для резонансных мод с продольным индексом  $q = 5$ .

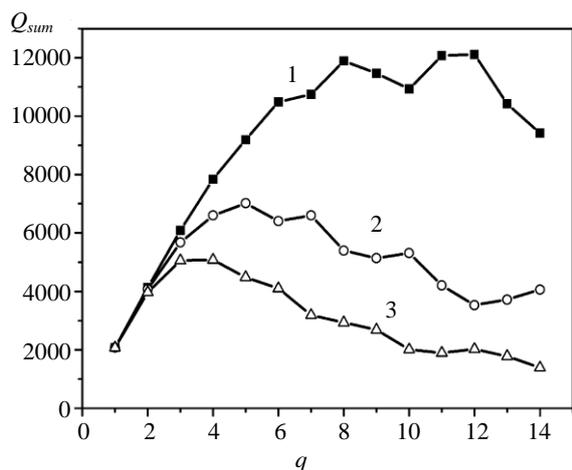


Рис. 4. Суммарная добротность мод в ОР с трапециевидными зеркалами на длине волны  $\lambda = 1$  мм: 1 –  $E_{0q}$ ; 2 –  $E_{1q}$ ; 3 –  $E_{2q}$

Рассмотрим поведение радиационной добротности и резонансной частоты мод  $E_{05}$ ,  $E_{15}$  и  $E_{25}$  в зависимости от ширины скосов  $b$  трапециевидных зеркал ( $L = 10\lambda$ ,  $\varphi = 5^\circ$ ). Резонансная частота волноводных мод  $E_{mq}$ , как и в ОР из двух параллельных полос [9], зависит от ширины плоской части  $L$  и глубины проникновения волны в запердельные участки волновода. Как видно на рис. 5, а, при увеличении ширины скосов сначала наблюдается снижение резонансной частоты мод, а при ширине скосов  $b \geq 0,9\lambda$  резонансная частота для мод  $E_{05}$ ,  $E_{15}$  и

$E_{25}$  остается постоянной. Для четных мод  $E_{05}$  и  $E_{25}$  радиационная добротность достигает насыщения при  $b \geq 1,3\lambda$ , а для нечетной  $E_{15}$ -моды максимум радиационной добротности достигается только при  $b \geq 1,9\lambda$  (рис. 5, б). Отметим, что уже при ширине скосов  $b = \lambda$  радиационная добротность для  $E_{05}$ -моды составляет  $\lg Q_{rad} = 4,908$ , а для  $E_{15}$ -моды –  $\lg Q_{rad} = 4,336$ , что вполне приемлемо для практических приложений ОР с трапециевидными зеркалами.

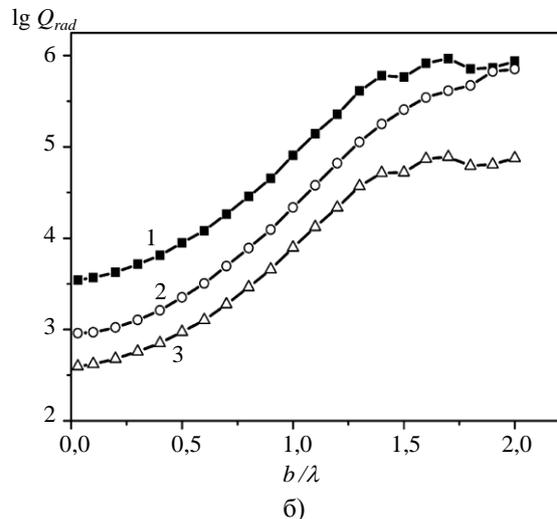
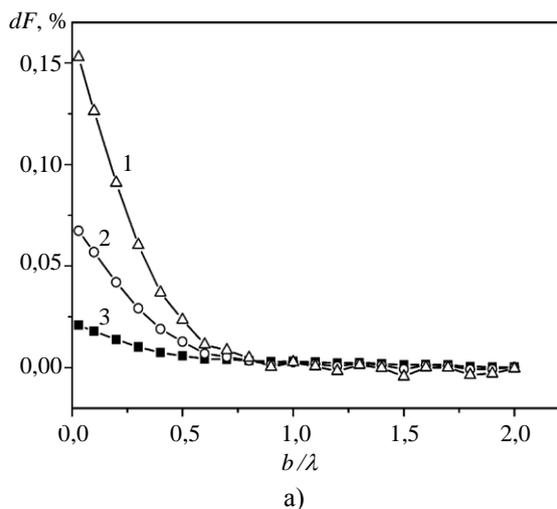


Рис. 5. Поведение резонансной частоты (а) и радиационной добротности мод (б) от ширины скосов трапециевидных зеркал: 1 –  $E_{05}$ ; 2 –  $E_{15}$ ; 3 –  $E_{25}$

Рассмотрим поведение радиационной добротности мод в зависимости от угла наклона скосов  $\varphi$ . При увеличении угла наклона скосов от  $\varphi = 0^\circ$  до  $\varphi = 5^\circ$  наблюдается монотонный рост радиационной добротности мод  $E_{05}$ ,  $E_{15}$  и  $E_{25}$  ( $L = 10\lambda$ ,  $b = 1,6\lambda$ ), а при дальнейшем увели-

чении угла наклона скосов наблюдается снижение радиационной добротности мод (рис. 6).

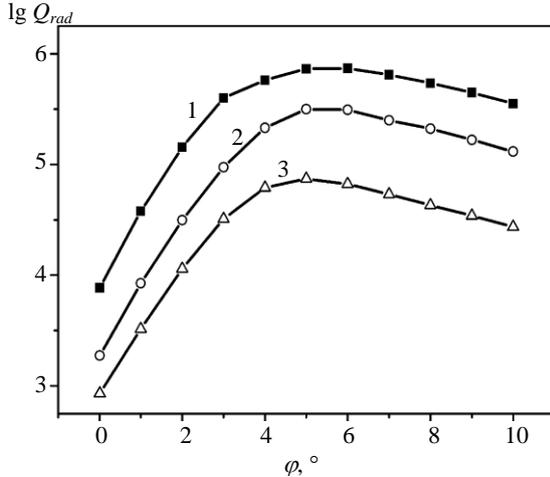


Рис. 6. Зависимость радиационной добротности мод от угла наклона скосов трапецидальных зеркал: 1 –  $E_{05}$ ; 2 –  $E_{15}$ ; 3 –  $E_{25}$

Рассмотрим влияние ширины плоской части трапецидальных зеркал  $L$  на радиационную добротность  $E_{05}$ -моды. Для ОР со скосами малой ширины  $b = \lambda$  ( $\varphi = 5^\circ$ ) радиационная добротность  $E_{05}$ -моды монотонно растет с увеличением ширины плоской части зеркал вплоть до  $L = 10\lambda$  (рис. 7). Для более широких скосов ( $b = 1,4\lambda$ ,  $b = 1,6\lambda$ ) наблюдается периодичность в изменении радиационной добротности от ширины плоской части зеркал, что вызвано интерференционным гашением волн, уходящих из резонатора вдоль оси  $OX$  (см. рис. 1).

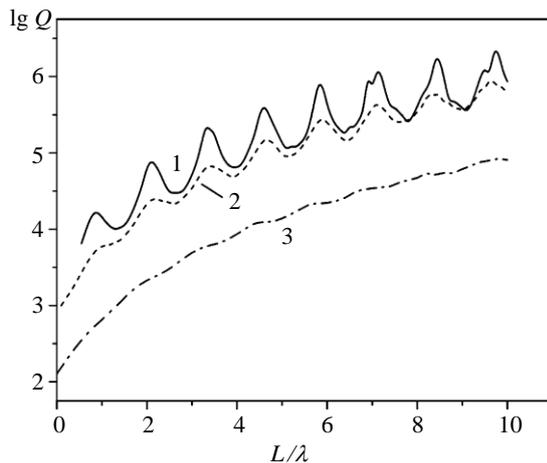


Рис. 7. Зависимость радиационной добротности  $E_{05}$ -моды от ширины плоской части трапецидальных зеркал: 1 –  $b/\lambda = 1,6$ ; 2 –  $b/\lambda = 1,4$ ; 3 –  $b/\lambda = 1,0$

При выборе резонансных значений для ширины плоской части зеркал  $L = 0,86; 2,12; 3,36; 4,60; 5,85$  имеется возможность существенно улучшить радиационную добротность  $E_{05}$ -моды,

что особенно важно для малогабаритных ОР с трапецидальными зеркалами.

### 3. Формирование нарастающих полей в ОР с трапецидальными зеркалами.

В теории генераторов с длительным взаимодействием показаны преимущества использования нарастающих полей в ОР для повышения электронного КПД и снижения влияния эффектов перегруппировки в электронном пучке [12]. Далее мы покажем, что такие нарастающие поля могут быть легко сформированы в ОР с трапецидальными зеркалами. Если одно из трапецидальных зеркал повернуть на небольшой угол  $\gamma$  (см. рис. 1), то для основной  $E_{0q}$ -моды косинусоидальное распределение поля в поперечном сечении резонатора трансформируется в нарастающее поле со смещенным от оси ОР максимумом поля и резким спадом амплитуды поля в области скосов (рис. 8, штрих-пунктирными линиями приведены контуры трапецидальных зеркал). Монотонно нарастающее поле вдоль оси  $OX$  можно реализовать в таком ОР уже при повороте одного из трапецидальных зеркал на угол  $\gamma = 0,1 - 0,2^\circ$ , что вполне приемлемо для практических приложений.

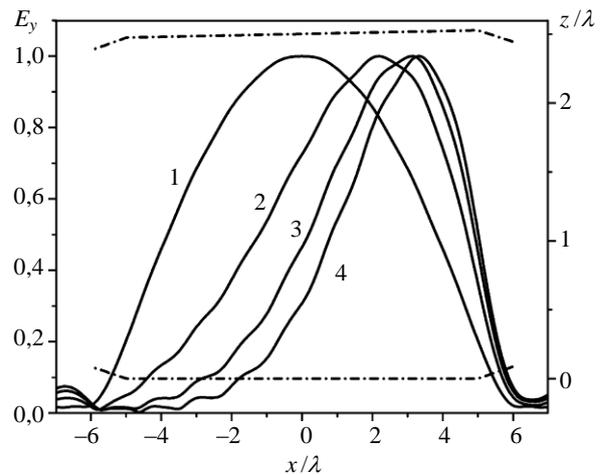


Рис. 8. Изменение распределения поля  $E_{05}$ -моды в трапецидальном ОР при повороте одного из зеркал на угол  $\gamma$ : 1 –  $\gamma = 0^\circ$ ; 2 –  $\gamma = 0,1^\circ$ ; 3 –  $\gamma = 0,2^\circ$ ; 4 –  $\gamma = 0,3^\circ$

Радиационная добротность  $E_{05}$ -моды в исследуемом ОР ( $L = 10\lambda$ ,  $\varphi = 5^\circ$ ) монотонно снижается при увеличении угла перекося  $\gamma$  трапецидальных зеркал (рис. 9). Однако уже при ширине скосов  $b = \lambda$  радиационная добротность  $E_{05}$ -моды при перекося зеркал на угол  $\gamma = 0,3^\circ$  остается достаточно высокой –  $\lg Q_{rad} = 4,021$ , что вполне приемлемо для использования на практике таких ОР с нарастающим полем. Для сравнения, радиационная добротность  $E_{05}$ -моды

в ОР с плоскими зеркалами той же ширины ( $L=10\lambda$ ) снижается с  $\lg Q_{rad} = 3,535$  при  $\gamma = 0^\circ$  до  $\lg Q_{rad} = 2,842$  при перекосе зеркал на угол  $\gamma = 0,3^\circ$  (рис. 9).

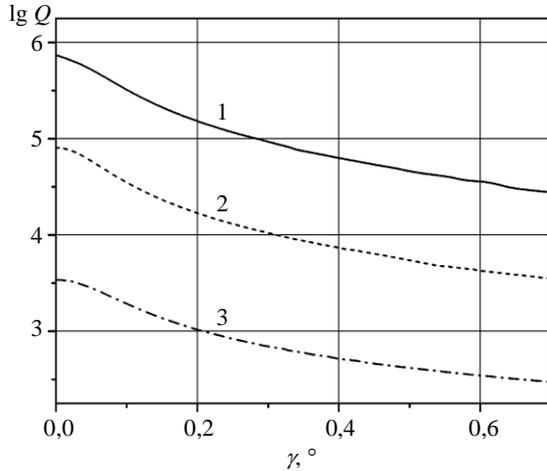


Рис. 9. Зависимость радиационной добротности  $E_{05}$ -моды от угла перекоса трапецидальных зеркал: 1 –  $b = 1,6\lambda$ ; 2 –  $b = 1,0\lambda$ ; 3 –  $b = 0$

**4. Свойства колебаний в ОР с уголковыми зеркалами.** В работе [10] приведены результаты исследований свойств колебаний в ОР с зеркалами в виде конуса и усеченного конуса, полученные с помощью асимптотической теории [10]. Также в работе [13] были получены оценочные результаты для колебаний в ОР с зеркалами в виде двухгранных отражателей. Было показано, что в этих резонаторах формируются колебания с гауссовым распределением поля, как и в ОР со сферическими зеркалами, так как образующая для поверхности конуса или усеченного конуса является кусочно-линейным приближением к дуге окружности – образующей сферического зеркала.

Используемая нами теоретическая модель при уменьшении ширины плоской части трапецидальных зеркал до  $L = 0$  (см. рис. 1) позволяет в строгой постановке рассмотреть свойства колебаний в резонаторе с уголковыми зеркалами. Проведем сравнение распределения полей в поперечном сечении двумерного ОР с трапецидальными зеркалами и в ОР с уголковыми зеркалами при одинаковой радиационной добротности колебаний. Параметры ОР-1 с трапецидальными зеркалами составляли:  $L = 10\lambda$ ,  $b = \lambda$ ,  $\varphi = 5^\circ$ ,  $D \approx 2,5\lambda$ . Для ОР-2 с уголковыми зеркалами была выбрана такая же апертура зеркал –  $2b = 12\lambda$ ,  $L = 0$ ,  $\varphi = 0,15^\circ$  и межзеркальное расстояние  $D \approx 2,5\lambda$ . При указанных параметрах уголковых зеркал распределение амплитуды поля

в поперечном сечении ОР-2 имеет гауссовый характер с шириной пятна поля  $2w_0 = 5,87\lambda$  (рис. 10). Радиационная добротность  $E_{05}$ -моды в сравниваемых резонаторах была практически одинаковой:  $\lg Q_{rad1} = 4,908$  и  $\lg Q_{rad2} = 4,854$ .

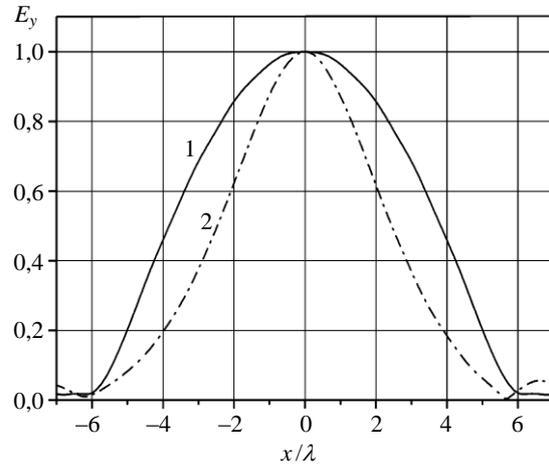


Рис. 10. Сравнение распределения полей  $E_{05}$ -моды в ОР с трапецидальными (1) и уголковыми (2) зеркалами

При сопоставлении энергетического распределения полей в сравниваемых резонаторах видно, что ОР-2 с уголковыми зеркалами уступает ОР-1 с трапецидальными зеркалами по коэффициенту использования апертуры зеркал:  $\eta_1 = 1,57\eta_2$ .

**Выводы.** Использование в ОР трапецидальных зеркал с шириной скосов  $b \geq \lambda$  позволяет сформировать протяженные поля и обеспечить снижение на 2–3 порядка радиационных потерь по сравнению с радиационными потерями в ОР с плоскими зеркалами. Проведенная оптимизация параметров трапецидальных зеркал показала технологическую доступность изготовления таких ОР в терагерцевом диапазоне частот и устойчивость возбуждаемых колебаний при разъюстировке зеркал. Протяженность поля в поперечном сечении такого ОР может составлять  $2\omega_0 \geq 10\lambda$ .

ОР с трапецидальными зеркалами может быть использован также для формирования нарастающих полей вдоль пространства взаимодействия ГДИ, для этого достаточно обеспечить поворот одного из трапецидальных зеркал на угол  $\gamma = 0,1 - 0,2^\circ$ , при этом добротность основной  $E_{05}$ -моды в ОР остается достаточно высокой  $\lg Q_{rad} = 4,021$ .

Показаны преимущества ОР с трапецидальными зеркалами над ОР с уголковыми зеркалами при формировании протяженных полей с высокой добротностью мод.

В заключение выражаем искреннюю признательность Ю. А. Тучкину, А. Е. Поединчуку и Ю. В. Свищеву за предоставленный в пользование пакет программ для анализа свойств колебаний в двухмерных ОР.

1. *Формирование* однородного поля в волноводном квазиоптическом резонаторе со сферическим выпуклым отражателем / А. В. Володенко, О. В. Гурин, А. В. Дегтярев и др. // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – 11, № 3. – С. 348–352.
2. *Формирование* негауссового профиля интенсивности в волноводном квазиоптическом резонаторе с асферическим отражателем / А. В. Володенко, О. В. Гурин, А. В. Дегтярев и др. // Квантовая электрон. – 2007. – 37, № 11. – С. 1065–1070.
3. *Design and construction of a prototype of flat top beam interferometer and initial tests* / J. Agresti, E. D'Ambrosio, R. DeSalvo et al. // J. Phys.: Conf. Series. – 2006. – 32. – P. 301–308.
4. *D'Ambrosio E. Non-spherical mirrors to reduce thermoelastic noise in advanced gravity wave interferometer* / E. D'Ambrosio // Phys. Rev. D. – 2003. – 67, ID 102004.
5. *Русин Ф. С. Оротрон как генератор миллиметрового диапазона* / Ф. С. Русин, Г. Д. Богомолов // Электроника больших мощностей. – М.: Наука, 1968. – С. 45–58.
6. *Мирошниченко В. С. Открытый резонатор с трапецидальным зеркалом для ГДИ терагерцевого диапазона* / В. С. Мирошниченко, В. Г. Дудка, Д. В. Юдинцев // 19-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 1. – С. 178–179.
7. *Поединчук А. Е. Метод задачи Римана-Гильберта в теории дифракции на экранах произвольного сечения* / А. Е. Поединчук, Ю. А. Тучкин, В. П. Шестопалов // Журн. вычисл. математики и мат. физики. – 1998. – 38, № 8. – С. 1314–1328.
8. *Новые методы решения прямых и обратных задач теории дифракции* / В. П. Шестопалов, Ю. А. Тучкин, А. Е. Поединчук, Ю. К. Сиренко – Х.: Основа, 1997. – 284 с.
9. *Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы* / Л. А. Вайнштейн. – М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
10. *Войтович Н. Н. Открытые резонаторы и линии с корректорами в виде конусов и усеченных конусов* / Н. Н. Войтович // Радиотехника и электрон. – 1966. – 11, № 3. – С. 488–494.
11. *Фиалковский А. Т. Открытые резонаторы, образованные плоскими зеркалами со скачком импеданса у краев* / А. Т. Фиалковский // Журн. техн. физики. – 1966. – 36, № 6. – С. 1100–1108.
12. *Еремка В. Д. Орботроны – многолучевые генераторы миллиметровых и субмиллиметровых волн* / В. Д. Еремка, А. А. Кураев, А. К. Сеницын // 14-я Междунар. Крымская

конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2004). – Севастополь: Вебер, 2004. – Т. 1. – С. 199–202.

13. *Торальдо ди Франчия Г. Резонаторы с двугранными отражателями* / Г. Торальдо ди Франчия // Квазиоптика. – М.: Мир, 1966. – С. 255–263.

## SHAPING OF EXTENDED FIELDS IN THE OPEN RESONATOR WITH TRAPEZOIDAL MIRRORS

V. S. Miroshnichenko, V. G. Dudka, D. V. Yudinsev

The singularities of use of trapezoidal mirrors for shaping extended fields in the open resonator (OR) for terahertz are surveyed. The results of a numerical modeling of properties of resonant modes in two-dimensional OR with trapezoidal mirrors are presented. The Q-factor and field structure for  $E_{0q}$ -,  $E_{1q}$ - and  $E_{2q}$ -modes in OR are determined. The optimization of trapezoidal mirror parameters to obtain a minimum of radiation losses in OR with an extended field is carried out. The singularities of increasing fields shaping in OR at rotation displacement of one trapezoidal mirror are surveyed. The comparison of mode properties in OR with corner mirrors and trapezoidal mirrors is carried out.

**Key words:** open resonator, trapezoidal mirror, corner mirror, radiation losses, ohmic losses, diffraction radiation oscillator.

## ФОРМУВАННЯ ПРОТЯЖНИХ ПОЛІВ У ВІДКРИТОМУ РЕЗОНАТОРІ З ТРАПЕЦІДАЛЬНИМИ ДЗЕРКАЛАМИ

В. С. Мирошниченко, В. Г. Дудка, Д. В. Юдинцев

Розглянуто особливості використання трапецидальних дзеркал для формування протяжних полів у відкритому резонаторі (ВР) терагерцевого діапазону. Наведено результати чисельного моделювання властивостей резонансних мод у двовимірному ВР із трапецидальними дзеркалами. Встановлено радіаційну добротність і структуру поля для  $E_{0q}$ -,  $E_{1q}$ - та  $E_{2q}$ -мод у ВР. Проведено оптимізацію параметрів трапецидальних дзеркал для зниження радіаційних втрат у ВР з протяжним полем. Розглянуто особливості формування наростаючих полів у ВР при повороті одного з трапецидальних дзеркал. Проведено порівняння властивостей мод у ВР з кутиковими та трапецидальними дзеркалами.

**Ключові слова:** відкритий резонатор, трапецидальне дзеркало, кутикове дзеркало, радіаційні втрати, омичні втрати, генератор дифракційного випромінювання.

*Рукопись поступила 9 февраля 2010 г.*