

ФОРМИРОВАНИЕ КВАЗИОДНОРОДНОГО ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛНОВОДНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ЗЕРКАЛОМ

А. В. Володенко, О. В. Гурин, А. В. Дегтярев, В. А. Маслов, В. А. Свич, А. Н. Топков

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

E-mail: Vyacheslav.A.Maslov@univer.kharkov.ua

Описан метод получения в волноводном металлическом резонаторе прямоугольного сечения волновых пучков выходного излучения с равномерным профилем интенсивности, основанный на свойствах самоизображения многомодового прямоугольного волновода и применении неоднородного зеркала с поглощающей либо фазосдвигающей маской. Развита теоретическая модель и численный алгоритм расчета характеристик мод такого резонатора с использованием метода собственных колебаний резонатора и методов фурье-оптики. Установлены условия существования основной моды при изменении геометрических параметров резонатора и неоднородного зеркала. Ил. 5. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: волноводный прямоугольный резонатор, фазосдвигающее зеркало, фурье-оптика, формирование лазерного пучка.

Для достижения оптимального результата в каждом практическом применении необходимо использовать определенное распределение интенсивности лазерного излучения. Такие распределения интенсивности пучка в резонаторах обычно называют специальными («*custom*») модами [1], так как их пространственный профиль оптимизирован для конкретного применения. Например, при использовании лазеров в технологиях поверхностной обработки материалов, для отжига дефектов полупроводников, локации, системах оптоэлектронной обработки информации, нелинейного преобразования, офтальмохирургии желательны пучки с равномерным поперечным распределением интенсивности излучения, резко спадающим на краях апертуры [2].

В литературе имеются данные о теоретических и экспериментальных исследованиях формирования азимутально симметричных однородных полей субмм излучения в круглых диэлектрических резонаторах волноводных лазеров с оптической накачкой [3]. Однако с точки зрения поляризационной устойчивости круглая форма поперечного сечения не представляется оптимальной. Поэтому в настоящей работе рассмотрена задача формирования однородного поля в металлическом волноводном квазиоптическом резонаторе (ВКР) прямоугольного сечения.

1. Теоретические соотношения. Теоретическое рассмотрение ВКР прямоугольного сечения (рис. 1) основано на методах фурье-оптики и собственных колебаний прямоугольного металлического волновода. В одном плече резонатора возле выходного полупрозрачного отражателя размещается полый металлический волновод прямоугольного сечения с геометрическими размерами в поперечном сечении $2a \times 2b$ ($a > b$). Его размеры должны соответствовать условиям самоизображения поперечных распределений волновых пучков

излучения в прямоугольных волноводах [4]. На расстоянии L_1 от торца волновода размещается тонкий линзовый корректор с фокусным расстоянием f , осуществляющий фурье-преобразование падающего поля. С другой стороны на расстоянии L_2 от линзы располагается неоднородное зеркало с размерами $4a \times 4a$ с амплитудным либо фазовым пространственным фильтром. Такие размеры отражателя выбраны с учетом допустимого ограничения поля данным зеркалом при минимальном влиянии на степень однородности выходного излучения.

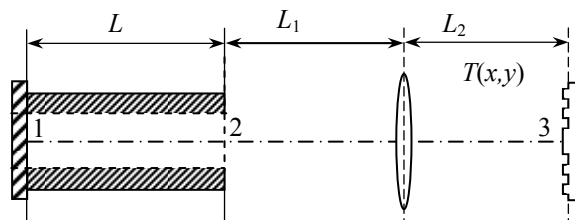


Рис. 1. Схема исследуемого резонатора

Для упрощения расчетов характеристик мод исследуемого ВКР будем считать, что линза, выполняющая фурье-преобразование поля, имеет бесконечные размеры, т. е. полностью перехватывает пучок излучения, вышедший из волновода. Получим интегральные уравнения, к которым сводится задача о собственных колебаниях в таком резонаторе в квазиоптическом приближении. Рассмотрим случай формирования на выходе резонатора однородного излучения, линейно поляризованного вдоль узкой стенки волновода. При таком выборе поляризации излучения в прямоугольном волноводе будут распространяться моды TE_{m0} -типа. Нормированные поперечные компоненты электрического поля для TE -волн прямоугольного волновода [5] в нашем случае имеют вид

$$\vec{V}_m(x, y) = \vec{y} \frac{1}{\sqrt{2ab}} \sin\left[\frac{m\pi}{a}(x+a)\right], \quad (1)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$

Таким образом, комплексная амплитуда компоненты электромагнитного поля волнового пучка на выходном отражателе резонатора в плоскости 1 (рис. 1) описывается выражением

$$U_{(1)}(x, y) = \sum_m C_m V_m(x, y), \quad (2)$$

где C_m – коэффициенты возбуждения соответствующих волноводных мод.

$$\Lambda C_g = \sum_m C_m \exp[iL(\gamma_m + \gamma_g)] \left[\frac{\exp[ik(L_1 + L_2)]}{i\lambda L_1 L_2 \mu} \right]^2 \times \left\{ \iint_{S_1} V_g(x_3, y_3) \iint_{S_2} T(x_2, y_2) Q(x_3, y_3, x_2, y_2, L_1, L_2) \iint_{S_1} V_m(x, y) Q(x_2, y_2, x_1, y_1, L_2, L_1) dS \right\}, \quad (3)$$

где $dS = dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 dx_3 dy_3$; $\mu = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} - \frac{1}{f}$;

$$Q(x, y, x_0, y_0, d_2, d_1) = \exp\left[i \frac{k}{2L_2} (x^2 + y^2) \left(1 - \frac{1}{\mu L_2} \right) \right] \times \exp\left[i \frac{k}{2L_1} (x_0^2 + y_0^2) \left(1 - \frac{1}{\mu L_1} \right) \right] \times \exp\left[-i \frac{k}{\mu L_1 L_2} (xx_0 + yy_0) \right];$$

$\gamma_{m(g)}$ – постоянные распространения волноводных мод.

Решение системы уравнений (3) дает собственные значения Λ и собственные векторы C , компоненты которых представляют собой коэффициенты разложения мод резонатора по волноводным модам. Относительные потери энергии Δ и фазовый набег моды φ за круговой обход резонатора определяются выражениями

$$\Delta = 1 - |\Lambda|^2, \quad \varphi = \text{Arg}(\Lambda). \quad (4)$$

Определим вид функции, описывающей коэффициент отражения неоднородного отражателя $T(x, y)$, необходимый для осуществления пространственной фильтрации излучения. Так как внутренняя линза в исследуемом ВКР осуществляет фурье-преобразование распространяющегося излучения, то для формирования однородного выходного поля необходимо, чтобы фазовый корректор из всего многообразия резонаторных мод выделял моду, фурье-образ которой представляет однородное поле. Фурье-образ однородной волны, распространяющейся из апертуры волновода с геометрическими размерами $2a \times 2b$, имеет вид функции отсчетов [7]

Используя традиционный подход для решения резонаторных задач [6] и принимая во внимание тот факт, что распределение поля до и после кругового обхода резонатора восстанавливается с точностью до постоянного комплексного множителя Λ (физический смысл которого состоит в том, что его модуль описывает уменьшение амплитуды, а аргумент – фазовый набег за круговой обход волны), получаем систему интегральных уравнений для нахождения распределения комплексной амплитуды компоненты поля $U_{(1)}(x, y)$ на выходном зеркале ВКР

$$E(x, y) \sim \frac{\lambda f}{x\pi} \sin\left(\frac{2\pi a}{\lambda f} x\right) \frac{\lambda f}{y\pi} \sin\left(\frac{2\pi b}{\lambda f} y\right). \quad (5)$$

Корни функции определяются следующими выражениями:

$$x_n = \frac{\lambda f}{2a} n, \quad y_n = \frac{\lambda f}{2b} n, \quad (6)$$

где $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Для формирования резонаторной моды с однородным распределением выходного излучения необходимо в узлах поля, описываемого функцией (5), на неоднородном зеркале резонатора разместить поглощающие или рассеивающие участки (поглощающая маска), либо фазосдвигающие (фазосдвигающая маска).

Коэффициент отражения неоднородного отражателя $T(x, y)$ тогда будет иметь вид

$$T(x, y) = Tx(x) Ty(y),$$

$$\text{где } Tx(x) = \begin{cases} 1 \\ 0(-1), \end{cases} \quad x_n - \frac{p}{2} \leq x \leq x_n + \frac{p}{2};$$

$$Ty(y) = \begin{cases} 1 \\ 0(-1), \end{cases} \quad y_n - \frac{p}{2} \leq y \leq y_n + \frac{p}{2};$$

p – ширина неоднородных участков. Отметим, что размеры разнородных участков должны превышать длину волны исследуемого излучения.

2. Результаты и их обсуждение. Расчеты комплексной матрицы в выражении (3) проводились на компьютере с применением пакета программ *Mathcad*. Изложенный подход применен к расчету характеристик мод металлического волновода резонатора (рис. 1) НСООН-лазера ($\lambda = 432,6$ мкм) при формировании квазиоднородного выходного поля, линейно поляризованного вдоль узкой стенки волновода. Прямоугольный

волновод изготовлен из меди с геометрическими размерами в поперечном сечении $11 \times 5,5 \text{ мм}^2$. Длина волновода составляет $L = 4a^2/\lambda$ согласно условию самоизображения поля в данных волноводах [4] с учетом спектральных особенностей исследуемого резонатора при возбуждении его линейно поляризованным пучком излучения. Линза имела фокусное расстояние $f = 80 \text{ мм}$. Рассмотрим случай идеального резонатора, где положим $L_1 = L_2 = f$. Геометрические размеры неоднородного отражателя составляют $22 \times 22 \text{ мм}^2$.

Для оценки степени однородности выходного поля резонатора введем среднеквадратичную меру различия δ , которая определяется следующим выражением [8]:

$$\delta = \frac{\sqrt{\int_{-a}^a [1 - I(x,0)]^2 dx}}{\sqrt{2a}}, \quad (7)$$

где $I(x,0)$ – распределение интенсивности выходного излучения резонатора в плоскости x (вдоль широкой стенки волновода).

В результате проведенных расчетов для предложенной геометрии резонатора установлено, что лучшее формирование однородного поля (δ минимально) достигается при использовании неоднородного отражателя, вид которого представлен на рис. 2.

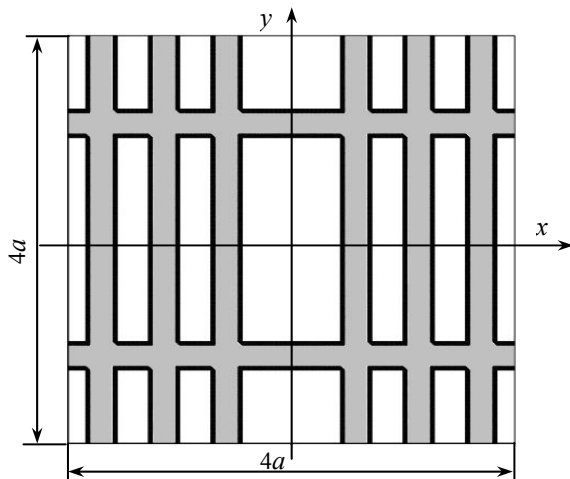


Рис. 2. Вид отражателя, применяемого для формирования однородного поля

На рис. 3 показаны выходные распределения интенсивности (кривая 1) и фазы (кривая 2) поля вдоль широкой стенки волновода при использовании на неоднородном зеркале резонатора поглощающей маски с шириной полос $p = 2\lambda$. Выходное излучение исследуемого резонатора примечательно тем, что оно имеет плоский фазовый фронт и достаточно близкий к равномерному профиль интенсивности. Среднеквадратичная ме-

ра различия между поперечными распределениями интенсивности эталонного однородного поля и сформированного излучения составляет в этом случае $\delta = 37 \%$.

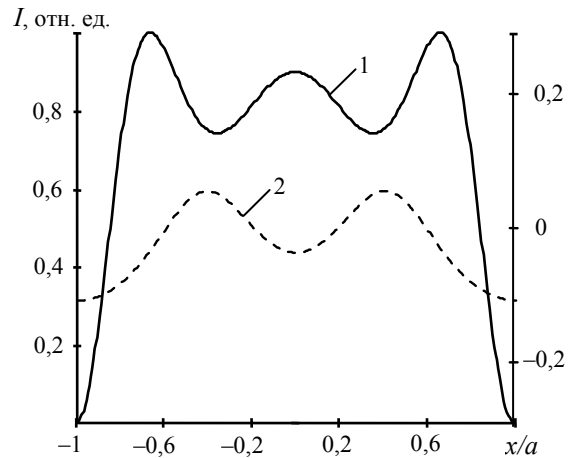


Рис. 3. Выходные распределения интенсивности 1 и фазы 2 поля вдоль широкой стенки волновода

На рис. 4 представлена зависимость относительных потерь энергии за круговой обход резонатора основной резонаторной моды в случае размещения на неоднородном зеркале поглощающей (кривая 1) и фазосдвигающей (кривая 2) масок от ширины полос p .

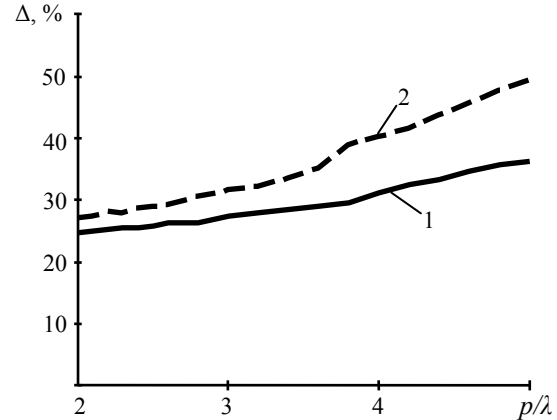


Рис. 4. Зависимость относительных потерь энергии за круговой обход резонатора Δ основной моды от ширины полос p/λ в резонаторе с поглощающей 1 и фазосдвигающей 2 масками

Видно, что для обеих масок характерен рост потерь основной моды резонатора с увеличением p , что объясняется ростом поглощения и рассеивания энергии в этом случае на неоднородном отражателе резонатора. Следует также отметить, что при одинаковой ширине полос поглощающая маска вносит меньшие потери энергии в основную моду, чем фазосдвигающая. Однако при таком соотношении между потерями для основной моды фазосдвигающая маска обладает лучшими характеристиками дискриминации мод, чем поглощающая.

На рис. 5 представлены результаты расчетов по исследованию устойчивости формирования однородного выходного излучения при смещении положения центров поглощающих полос от координат нулей поля вида функции отсчетов (5), формирующегося на неоднородном зеркале.

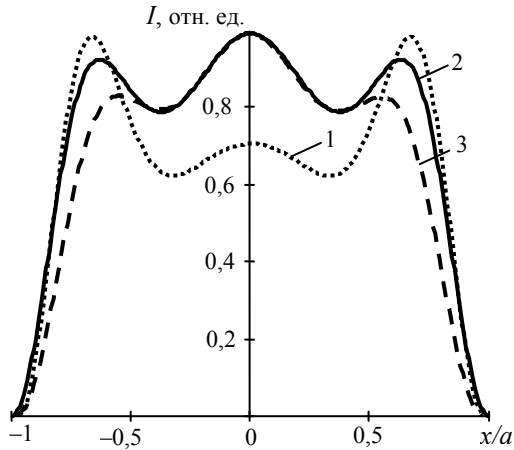


Рис. 5. Выходные распределения интенсивности поля вдоль широкой стенки волновода при различных смещениях центров узловых линий поглощающей маски (1 – $-0,5\lambda$; 2 – $0,5\lambda$; 3 – λ) при ширине полос $p/\lambda = 2$

При приближении данных узловых линий к центру зеркала ($x_n - 0,5\lambda$) наблюдается ухудшение однородности выходного поля ($\delta = 41\%$). При отдалении узлов от центра зеркала на расстояние порядка $x_n + 0,5\lambda$ степень однородности поля на выходе резонатора увеличивается ($\delta = 38\%$). На расстояниях, больших $x_n + \lambda$, также наблюдается ухудшение однородности выходного поля ($\delta = 42\%$). Такое поведение кривых на рис. 5 обусловлено тем, что при приближении поглощающих полос к центру зеркала относительная доля энергии моды TE_{10} (основной при формировании однородного поля) в спектр выходного излучения уменьшается по сравнению с остальными волноводными модами, а при удалении от центра зеркала – увеличивается.

Выводы. Таким образом, приведенные результаты теоретически подтверждают возможность формирования в субмм диапазоне длин волн в предложенной схеме волноводного металлического прямоугольного резонатора с неоднородным отражателем моды, которая имеет профиль интенсивности излучения на выходном зеркале, близкий к однородному.

1. Gerber M., Graf T., Kudryashov A. Generation of custom modes in a Nd:YAG laser with a semipassive bimorph adaptive mirror // *Appl. Phys. B.* – 2006. – 83, no. 4. – P. 43–50.
2. Dickey F. M., Holswade S. C., Shealy D. Laser beam shaping applications. – New York: CRC Press, 2005. – 376 p.

3. Володенко А. В., Гурин О. В., Дегтярев А. В. и др. Формирование негауссового профиля интенсивности в волноводном квазиоптическом резонаторе с асферическим отражателем // *Квантовая электроника.* – 2007. – 37, № 11. – С. 1065–1070.
4. Володенко А. В., Гурин О. В., Дегтярев А. В. и др. Передача и самоизображение субмиллиметровых лазерных пучков в металлических прямоугольных волноводах // *Квантовая электроника.* – 2006. – 36, № 2. – С. 149–153.
5. Справочник по волноводам / Пер. с англ. под ред. Я. Н. Фельда. – М.: Сов. Радио, 1952. – 432 с.
6. Фокс А., Ли Т. Резонансные типы колебаний в интерферометре квантового генератора // *Лазеры* / Пер. с англ. под ред. М. Е. Жаботинского и Т. А. Шмаонова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 325–362.
7. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / Пер. с англ. под ред. Г. И. Косоурова. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
8. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Теория восстановления сигналов. – М.: Радио и связь, 1979. – 272 с.

FORMATION OF THE QUASIUNIFORM OUTPUT RADIATION IN THE WAVEGUIDE METAL RECTANGULAR RESONATOR WITH A NONUNIFORM MIRROR

A. V. Volodenko, O. V. Gurin, A. V. Degtyarev, V. A. Maslov, V. A. Svich, A. N. Topkov

The method of obtaining wave beams with a uniform intensity profile in the waveguide metal rectangular resonator is described. It is based on the self-imaging properties of multimode rectangular waveguides and using the nonuniform mirror with the discretely distributed absorbing or scattering sections. The theoretical model and calculation algorithm of characteristics of the low-loss Fourier-mode with uniform intensity distribution at the output mirror of the WQR are developed with application of the eigenmodes and the Fourier-optics methods. The conditions of Fourier-mode existence are established by changing the resonator geometry and its nonuniform mirror parameters.

Key words: waveguide rectangular resonator, phase-shifting mirror, Fourier-optics, laser beam shaping.

ФОРМУВАННЯ КВАЗІОДНОРІДНОГО ВИХІДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У ХВИЛЕВІДНОМУ МЕТАЛЕВОМУ ПРЯМОКУТНОМУ РЕЗОНАТОРІ З НЕОДНОРІДНИМ ДЗЕРКАЛОМ

О. В. Володенко, О. В. Гурін, А. В. Дегтярьов, В. О. Маслов, В. А. Свіч, О. М. Топков

Описано спосіб одержання у хвилевідному металевому резонаторі прямокутного перетину хвильових пучків вихідного випромінювання з рівномірним профілем інтенсивності, заснований на властивостях самозображення багатомодового прямокутного хвилеводу й застосуванні неоднорідного дзеркала з поглинаючою або фазозсувною маскою. Розвинено теоретичну модель і чисельний алгоритм розрахунку характеристик мод такого резонатора з використанням методу власних коливань резонатора й методів фур'є-оптики. Установлено умови існування основної моди при зміні геометричних параметрів резонатора й неоднорідного дзеркала.

Ключові слова: хвилевідний прямокутний резонатор, фазозсувне дзеркало, фур'є-оптика, формування лазерного пучка.

Рукопись поступила 8 декабря 2008 г.