

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД ПО ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ ОТКРЫТОГО ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

При исследовании, расчётах и конструировании лазеров, лазерных устройств и систем бывает необходимо знание распределения интенсивности излучения или напряженности электрической составляющей электромагнитного поля лазерного излучения на поверхности зеркала открытого резонатора той или иной конфигурации.

Нахождение распределения электромагнитного поля излучения на зеркалах резонатора заключается в определении условий существования в открытом резонаторе стационарных распределений такого поля и соответствующих им потерь.

Из известных в настоящее время методов теоретического исследования открытых резонаторов широко используются следующие методы:

1. Метод, основанный на теории дифракции волн на открытом конце волновода, разработанный Л.А. Вайнштейном [1]. Суть этого метода состоит в том, что малые потери на излучение в открытых резонаторах можно объяснить тем, что к краю резонатора приходит волна, частота которой незначительно превышает её критическую частоту. Как известно, такая волна почти не излучается, а отражается обратно с коэффициентом отражения близким к единице.

2. Метод, основанный на применении скалярной теории дифракции с использованием интегрального уравнения Кирхгоффа. Этот метод позволяет найти распределение поля на поверхности одного зеркала резонатора, зная распределение поля на поверхности другого зеркала [2].

В данной работе для исследования распределений интенсивности излучения и напряженности электрической составляющей электромагнитного поля излучения на поверхности зеркал открытого резонатора был использован метод Л.А Вайнштейна.

Нормированное распределение плотности потока излучения на поверхности плоского зеркала прямоугольной апертуры для моды  $TEM_{mn}$  определяется выражением:

$$U_{mn}(x, y) = \left\{ \begin{array}{l} \cos^2 \\ \sin^2 \end{array} \left[ \frac{\pi \cdot (m+1) \cdot x}{2 \cdot a \cdot \left( 1 + \frac{\beta}{\sqrt{8 \cdot \pi \cdot N_a}} \right)} \right] \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos^2 \\ \sin^2 \end{array} \left[ \frac{\pi \cdot (n+1) \cdot y}{2 \cdot b \cdot \left( 1 + \frac{\beta}{\sqrt{8 \cdot \pi \cdot N_b}} \right)} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $m$  и  $n$  – продольный и поперечный индексы поперечной моды;  
 $x$  и  $y$  – текущие прямоугольные координаты в сечении пучка, м;  
 $a$  и  $b$  – размеры прямоугольной апертуры по осям  $x$  и  $y$  соответственно, м;  
 $N_a$  и  $N_b$  – числа Френеля, соответствующие характерным размерам апертуры;  
 $\beta = 0,824$  – параметр в теории открытых оптических резонаторов, разработанный Л.А. Вайнштейном [1].

Функция  $\cos$  относится к чётным значениям индексов мод, а  $\sin$  – к нечётным. Число мод зависит от уровня накачки.

В плоском резонаторе с круглым сечением нормированное распределение интенсивности на поверхности зеркал с круглой апертурой имеет вид:

$$U_{pl}(r, \varphi) = \left( J_p \left[ \frac{V_{p(l+1)} \cdot r}{a \cdot \left( 1 + \frac{\beta}{\sqrt{8 \cdot \pi \cdot N_a}} \right)} \right] \right)^2 \cdot (\cos(l \cdot \varphi))^2, \quad (2)$$

где  $p$  и  $l$  – радиальный и аксиальный индексы поперечной моды;  
 $r$  – текущая радиальная полярная координата в сечении пучка, м;  
 $\varphi$  – текущая аксиальная полярная координата в сечении пучка, рад;  
 $a$  – радиус апертуры резонатора, м;  
 $N_a$  – число Френеля, соответствующее радиальному размеру апертуры;  
 $J_p$  – функция Бесселя первого рода  $p$ -го порядка;  
 $V_{p(l+1)}$  –  $(l+1)$ -й корень функции Бесселя первого рода  $p$ -го порядка.

Пространственные характеристики электромагнитного поля излучения резонатора, состоящего из сферических или сферического и плоского зеркал, имеют ряд характерных особенностей, главной из которых является независимость поперечных размеров распределения (пятна) от размеров поперечного сечения резонатора (апертуры зеркал).

Для сферических зеркал с прямоугольной апертурой распределение интенсивности поля излучения для поперечной моды  $TEM_{mn}$  имеет вид:

$$U_{mn}(x, y) = H_m^2 \left( \sqrt{2} \cdot \frac{x}{w} \right) \cdot H_n^2 \left( \sqrt{2} \cdot \frac{y}{w} \right) \cdot \exp \left( -2 \cdot \frac{x^2 + y^2}{w^2} \right), \quad (3)$$

где  $m$  и  $n$  – продольный и поперечный индексы поперечной моды;  
 $x$  и  $y$  – текущие прямоугольные координаты в сечении пучка, м;  
 $w$  – параметр, характеризующий масштаб сечения (размер пятна), м;  
 $H_m$  и  $H_n$  – полиномы Эрмита порядка, соответствующего индексу поперечной моды.

Для сферических зеркал с круглой апертурой распределение интенсивности поля излучения для поперечной моды  $TEM_{pl}$  имеет вид:

$$U_{pl}(r, \varphi) = \left( \sqrt{2} \cdot \frac{r}{w} \right)^{2 \cdot l} \cdot \left[ L_p^l \left( 2 \cdot \frac{r^2}{w^2} \right) \right]^2 \cdot \exp \left( -2 \cdot \frac{r^2}{w^2} \right) \cdot (\cos(l \cdot \varphi))^2, \quad (4)$$

где  $p$  и  $l$  – радиальный и аксиальный индексы поперечной моды;  
 $r$  – текущая радиальная полярная координата в сечении пучка, м;  
 $\varphi$  – текущая аксиальная полярная координата в сечении пучка, рад;  
 $w$  – параметр, характеризующий масштаб сечения (размер пятна), м;  
 $L_p$  – полином Лагерра  $p$ -го порядка.

На рис. 1 показаны эпюры нормированного распределения интенсивности излучения на поверхности зеркал резонатора с плоскопараллельными зеркалами прямоугольной апертуры для мод:  $TEM_{00}$  – рис. 1 а,  $TEM_{10}$  – рис. 1 в,  $TEM_{11}$  – рис. 1 д. На рис. 1 б – е, показаны эпюры нормированного распределения интенсивности излучения для тех же мод как вид «сверху» при расположении точки наблюдения по оси резонатора.

На рис. 2 показаны эпюры нормированного распределения интенсивности излучения на поверхности зеркал конфокального резонатора со сферическими зеркалами прямоугольной апертуры для мод:  $TEM_{00}$  – рис. 2 а,  $TEM_{10}$  – рис. 2 в,  $TEM_{11}$  – рис. 2 д.

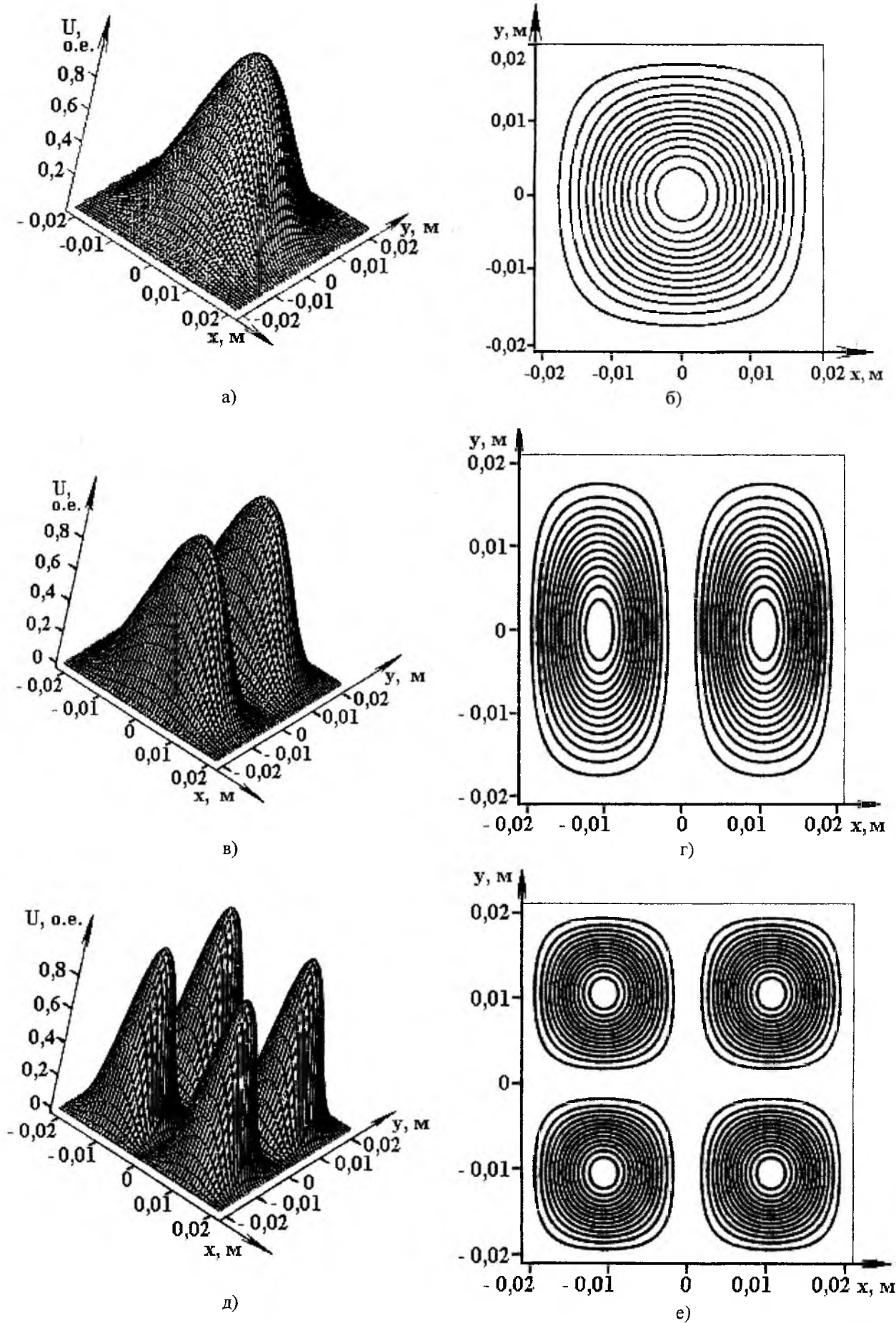


Рис. 1

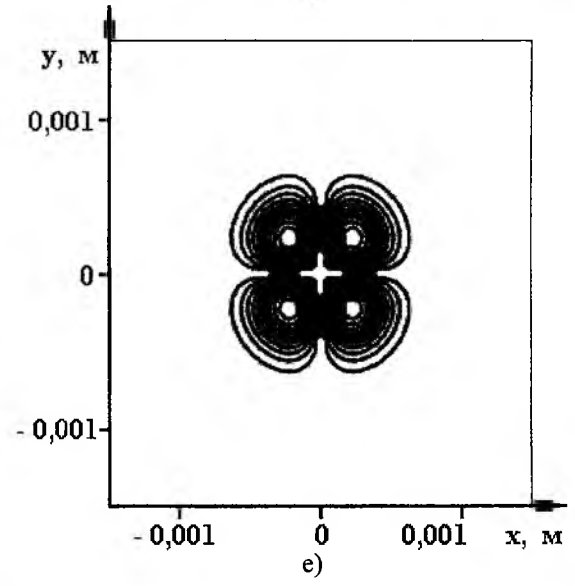
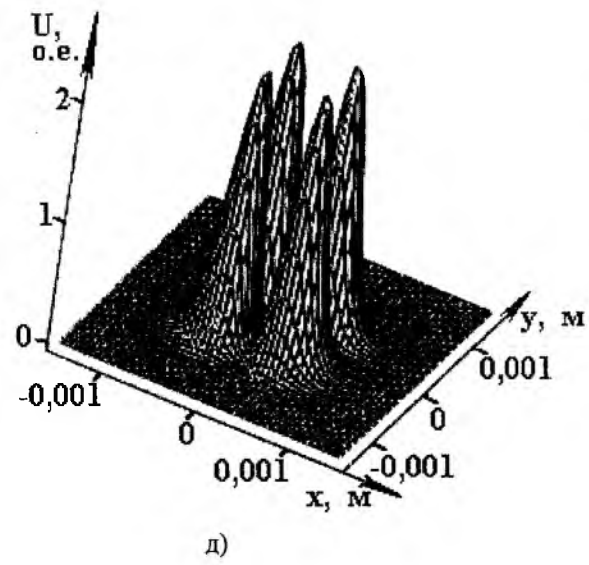
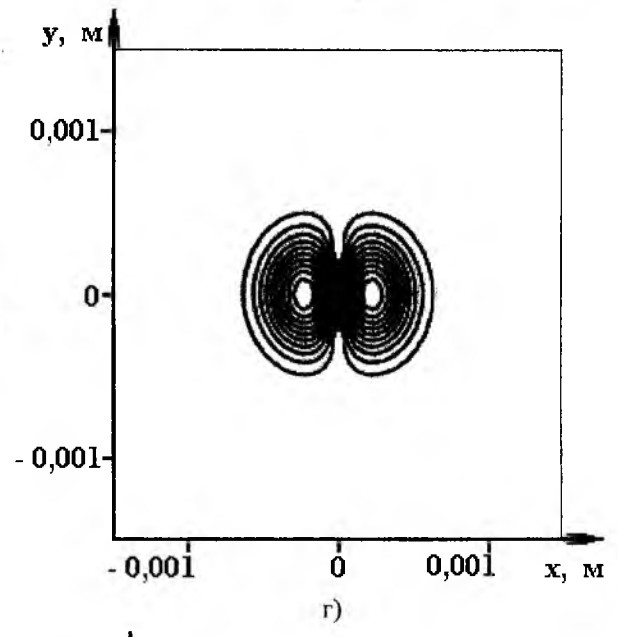
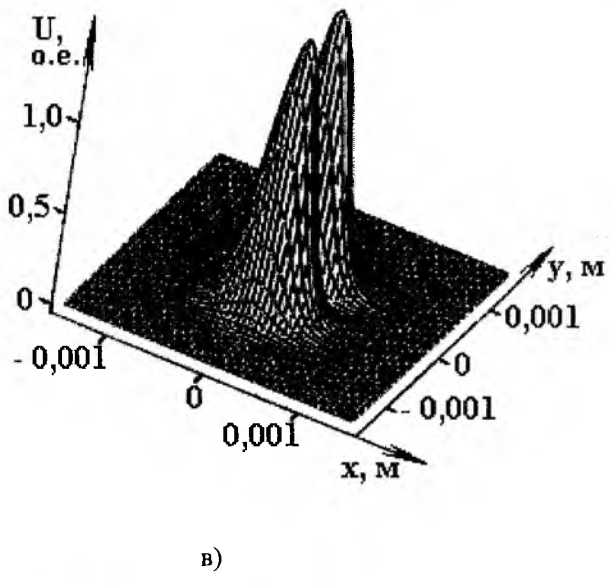
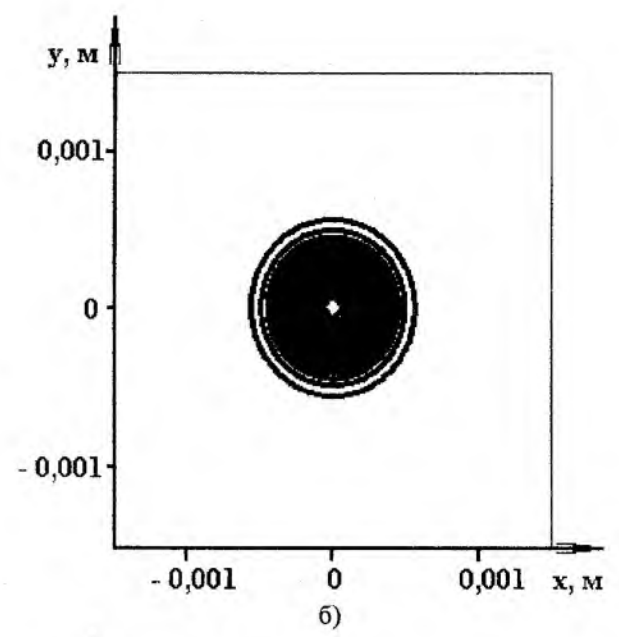
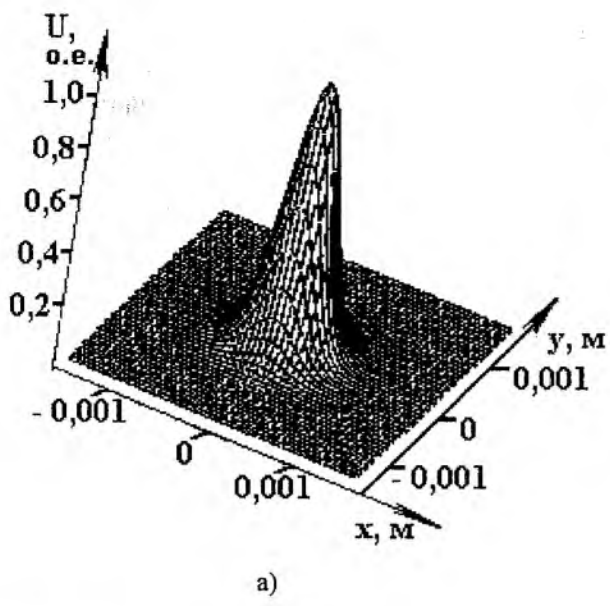


Рис. 2

На рис. 2 б – е, показаны эпюры нормированного распределения интенсивности излучения для тех же мод как вид «сверху» при расположении точки наблюдения по оси резонатора.

Расчёты нормированного распределения интенсивности проводились по формулам (1) – для резонатора с плоскими зеркалами прямоугольной апертуры и (3) – для конфокального резонатора со сферическими зеркалами прямоугольной апертуры с использованием математического пакета Mathcad 2000 pro. Расчёты для зеркал с круглой апертурой могут быть проведены по формулам (2) и (4) с использованием аналогичных алгоритмов и программ [3, 4].

Как следует из приведенных рисунков, основная мода  $TEM_{00}$  имеет распределение, описываемое функцией Гаусса, симметрично расположенной относительно начала координат. Для мод высших порядков нормированное распределение интенсивности излучения носит более сложный характер – с симметричным распределением максимумов и нулевых минимумов. Число минимумов в распределении равно соответствующему индексу моды, а число максимумов на единицу больше. Периферийные максимумы имеют большую ширину, чем центральные.

Для сферических зеркал нормированное распределение интенсивности излучения как для основной моды, так и мод высших порядков, аналогично распределению на плоских зеркалах, однако максимумы интенсивности сильно локализованы у центра зеркала (по оси резонатора).

Формулы (1) – (4) позволяют определить нормированное распределение интенсивности излучения для поперечной моды с произвольным значением  $m$  и  $n$  в открытом оптическом резонаторе практически любой конфигурации.

**Список литературы:** 1. Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 475 с. 2. Климков Ю.М. Основы расчёта оптико-электронных приборов с лазерами. М.: Сов. радио, 1978. 264 с. 3. Бондаренко М.Ф., Биков М.М., Дзюбенко М.І., Пащенко А.Г., Пащенко Ж.Ф. Прилади та пристрої квантової електроніки з використанням ЕОМ для дослідження і аналізу. Харків: ХНУРЕ, 2002. 388 с. 4. Херхагер М., Партоль Х. Mathcad 2000: полное руководство: Пер. с нем. К.: Издательская группа BHV, 2000. 416 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 30.01.2003*