

金属亚波长波导阵列的聚焦和分束

付康印 陈跃刚

(贵州大学物理系, 贵州 贵阳 550025)

摘要 由于光波在不同长度的波导中传输产生的相位延迟不同, 特定的波导阵列可以对光波波阵面进行调制。理论推导发现三角形波导阵列可以实现聚焦, 得出凸三角形波导阵列聚焦高度和焦深。利用时域有限差分法模拟了凸三角形波导阵列对光波的聚焦情况, 通过比较发现模拟和理论推导结果非常吻合。同时模拟发现凹三角形波导阵列结构可以实现光的分束。

关键词 光通信; 聚焦和分束; 时域有限差分方法; 波导阵列; 亚波长金属结构

中图分类号 O484.4; TN25; TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0523003

Focusing and Beam Splitting of Metal Sub-Wavelength Waveguide Array

Fu Kangyin Chen Yuegang

(Department of Physics, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract Due to different phase delay of light wave propagating through waveguides with different length, wave front can be modulated by waveguide array. Based on theoretical derivation, the focused wave can be obtained through triangular waveguide array. Using the finite-difference in time-domain method, the focusing in the convex triangular waveguide arrays is simulated, and the results agree with theoretical derivation well. Simulation results also indicate that the concave triangular waveguide array can split the beam.

Key words optical communications; focusing and beam splitting; finite difference time domain; waveguide array; subwavelength metal structure

OCIS codes 230.1360; 230.7380; 050.6624; 240.6680; 310.6628

1 引 言

根据经典理论, 传统光学器件的空间分辨率受到衍射极限的限制, 光波在狭缝中的透射率正比于狭缝大小以及入射波长比值的四次方, 而金属薄膜中亚波长狭缝的透射率极小^[1]。1998年, Ebbesen等^[2]研究发现光波通过金属薄膜上亚波长孔阵列出现强透射效应, 认为其主要原因是金属表面产生表面等离子体共振。随后在2002年 Lezee等^[3]通过在微型小孔周围刻上周期结构控制表面等离子体, 可将其辐射场压缩成为很窄的光束。利用金属亚波长结构对表面等离子体的控制可以实现光学超分辨率纳米光刻等^[4,5]技术的应用。还有, 在金属亚波

长单缝周围刻上凹槽, 控制金属表面等离子体激元来实现光束的聚焦和准直^[6~11], 金属表面等离子体成为研究热点。

2009年, Saj^[12]利用时域有限差分(FDTD)方法模拟了由金属波导阵列构成的二维等腰三角形中的光传输, 高斯光束入射到前侧的平面光栅, 经过波导阵列出射光在后凸三角形两腰产生折射, 折射光在三角形的尖端后干涉, 实现聚焦。2010年, Shinji Kameda^[13]提出一种金属波导阵列的微光学棱镜和微凸镜, 利用阵列的光学高色散特性, 通过大量的模拟优化设计出了两种结构, 一种圆弧形弯曲波导阵列实现光波的曲线传输, 另一种凸椭圆形阵列实现

收稿日期: 2010-11-17; 收到修改稿日期: 2010-12-28

基金项目: 贵州省自然科学基金[黔科合J(2008)2046]和贵州大学基金[贵大人基合字(2007)029]资助课题。

作者简介: 付康印(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事亚波长金属阵列结构光传输方面的研究。

E-mail: fu_kangyin@126.com

导师简介: 陈跃刚(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事亚波长金属阵列结构光传输、光子晶体等方面的研究。

E-mail: cyg000@163.com(通信联系人)

聚焦。另外, Dawoon Choi 等^[14]利用一种半圆金属层上刻有亚波长狭缝阵列实现聚焦。

本文研究了由金属 Ag 构成的三角形亚波长波导阵列对光束的控制, 根据光波在不同长度的波导中传输产生不同的相位延迟, 当各波导中出射的光波在某点相位差为 2π 整数倍时, 可实现聚焦。通过 FDTD 方法进行模拟研究波导宽度、三角形锐度和金属薄膜厚度等参数对光场的聚焦性质产生影响。根据聚焦情况的变化规律, 通过调节各参数以设计凸三角形波导阵列聚焦器件和凹三角形波导阵列的分束器件。

2 理 论

文中主要用到波导阵列, 其中的波导可以认为由金属-介质-金属三层构成, 波导的基模平均有效折射率大小跟介质和金属内壁有关, 根据文献^[15~18]提出的对称性金属波导表面等离子体激元的有效折射率, 以及波导等离子体色散关系为

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0}, \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_d}{\epsilon_m} \frac{q}{k} = \frac{1 - \exp(kw)}{1 + \exp(kw)}, \quad (2)$$

$$k = k_0 \sqrt{(\beta/k_0)^2 - \epsilon_d}, \quad (3)$$

$$q = k_0 \sqrt{(\beta/k_0)^2 - \epsilon_m}, \quad (4)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5)$$

式中 β 是波导中表面等离子体传播常数, ϵ_d 是波导中介质的介电常数, ϵ_m 是波导中金属的介电系数, w 是波导的宽度, λ 是入射波长。根据(1)~(5)式可以得出波导有效折射率与波导宽度的关系:

$$\omega = \frac{1}{k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d}} \times \ln \left[1 - 2 / \left(1 + \frac{\epsilon_m}{\epsilon_d} \sqrt{1 - \frac{\epsilon_d - \epsilon_m}{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m}} \right) \right], \quad (6)$$

由上式可知有效折射率随波导宽度的增加而减小。

设计一种凸三角形金属亚波长波导阵列的聚焦器件, 结构如图 1 所示。在图 1 中, 白色区域表示真空, 黑色区域表示金属。 p 为 x 方向上凸三角形阵列周期, w 为 x 方向上波导宽度, h 为凸三角形阵列在 y 方向上厚度, 波导顺序 m 为从凸三角形的中央向外依次排布 $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$, $h(m)$ 为第 m 个波导的长度, d 为相邻波导的长度差, α 为凸三角形的锐度, f 为聚焦高度。

由于凸三角形结构中的波导长度不同, 光波在

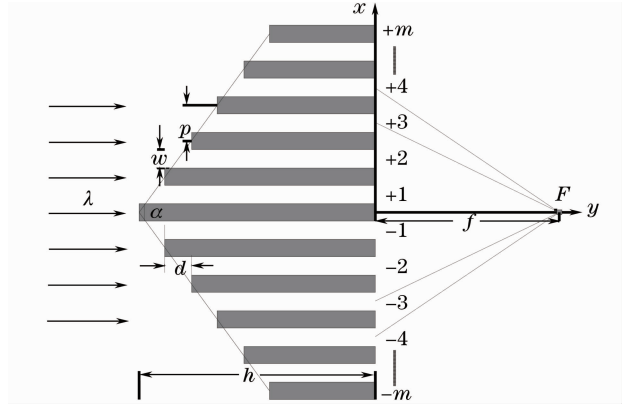


图 1 凸三角形金属亚波长波导阵列结构
Fig. 1 Structure of convex triangular metal subwavelength waveguide array

经过波导时产生不同的相位延迟^[19~21], 其通过凸三角形阵列结构的第 m 个波导产生的相位延迟为

$$\Delta\varphi_1(m) = k_0 n_0 [h - h(m)] + k_0 h(m) \text{Re } n_{\text{eff}} + \arg r_{12}. \quad (7)$$

式中 n_0 为介质的折射率, n_{eff} 为波导的有效折射率, $\arg r_{12}$ 为在凸三角形前后表面激发表面等离子体激元产生的附加相位。根据(7)式可知, 随着波导位置由中央向两侧扩展的过程中, 波导的长度减小, 其产生的相位延迟减小。

根据惠更斯-菲涅耳原理, 每一个波导出射端可视为一个新的次波源 S , 其第 m 个波导发出光波传播到相距 r 的光轴上 F 点的相位延迟为

$$\Delta\varphi_2(m) = k_0 n_0 r = k_0 n_0 \sqrt{f^2 + x(m)^2}, \quad (8)$$

式中 f 为聚焦高度, 即光束聚焦位置与出射面之间的距离, $x(m)$ 为第 m 个波导与 y 轴之间的距离。各个波导出射口的次波源 S 发射的光波在 F 点叠加。要求在 F 点聚焦, 则结构中相邻波导的相位差应该满足以下关系:

$$\Delta\varphi_1(m+1) + \Delta\varphi_2(m+1) = \Delta\varphi_1(m) + \Delta\varphi_2(m) + 2N\pi, \quad (9)$$

式中 N 为整数。当 $N=0$ 时, 由上式可得任意两个相邻波导聚焦高度为

$$f = \frac{\sqrt{(X+Y-S)^2 - 4XY}}{2S}, \quad (10)$$

式中 $X = \left(\frac{2m+1}{2}p\right)^2$, $Y = \left(\frac{2m-1}{2}p\right)^2$, $S = (n_{\text{eff}} - n_0)d$ 。根据(10)式, 选用结构参数为 $p=200 \text{ nm}$, $\alpha=90^\circ$, $h=4000 \text{ nm}$, $w=100 \text{ nm}$, 可以计算出凸三角形金属亚波长结构的相邻波导聚焦高度, 如表 1 所示。由此可知随着凸三角形金属结构上刻的波导数目增加, 光聚焦高度变大。

表 1 相邻波导的聚焦高度
Table 1 Focal height of adjacent waveguide

Adjacent waveguide number	Focal height / μm
1,2	0.70
2,3	1.39
3,4	2.00
4,5	2.70
5,6	3.48
6,7	4.17
7,8	4.87
8,9	5.57
9,10	6.27

为了验证这种规律,利用 FDTD 方法^[22~26]模拟,采用 TM 偏振($H_z, E_x, E_y \neq 0$)的高斯光束垂直入射,其中心频率的波长选用 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,束腰半径为 $9 \mu\text{m}$ 。计算有限的空间,计算区域四周边界为

完全匹配层(PML)边界。金属具有的色散性,用 Drude 模型^[24,25]来描述介电系数随入射频率的变化:

$$\epsilon_M(\omega) = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \right], \quad (11)$$

式中 ω 为入射波的角频率, ϵ_0 为真空中的电介质常数, ω_p 为金属的等离子共振特征频率和 γ 是振动阻尼系数。由于金属 Ag 在可见光波段具有最小的吸收损耗,本文中用到金属银,其 $\omega_p = 1.37 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ 和 $\gamma = 3.21 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ 。

研究凸三角形波导阵列数目对聚焦的影响。选定结构参数为: $p = 200 \text{ nm}$, $\alpha = 90^\circ$, $w = 100 \text{ nm}$, $d = 200 \text{ nm}$,不同的波导数目,光场聚焦情况不相同,如图 2 所示。

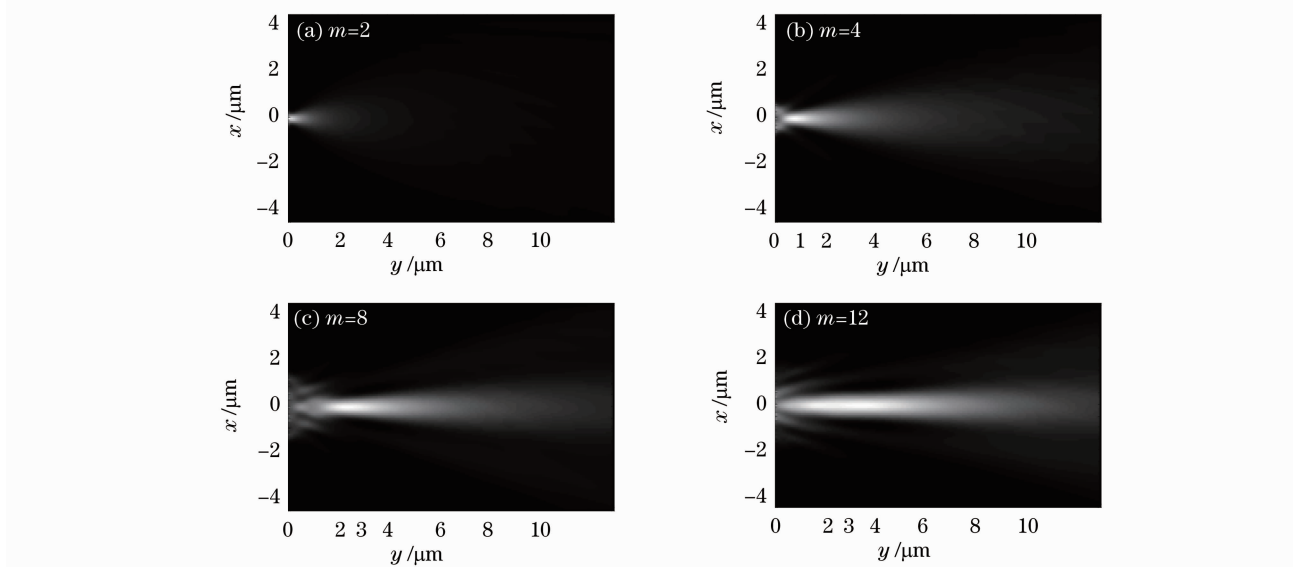


图 2 不同波导数目的透射光场

Fig. 2 Transmitted light fields with different waveguide number

聚焦深度在器件设计中是一个重要的性质。这里理论计算焦深是指通过(10)式计算得到第 1,2 波导的聚焦高度与第 $m, m+1$ 波导的聚焦高度之差。

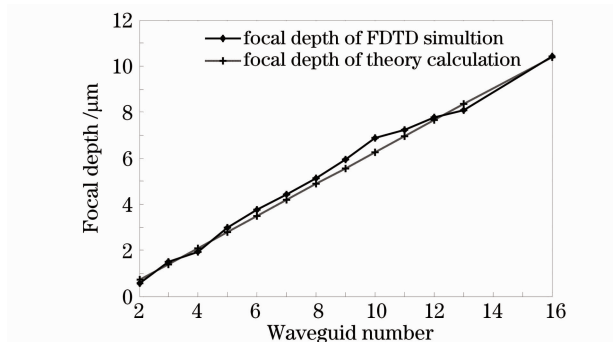


图 3 不同波导数目的焦深

Fig. 3 Focal depths with different waveguide number

在 FDTD 模拟中焦深是指射出面后聚焦光束在 y 方向上半峰全宽。理论计算的焦深和 FDTD 模拟的焦深计算结果如图 3 所示。随着波导数目增加,理论计算和模拟得到的焦深增加。根据此规律,可以设计长焦深聚焦器件。另外,理论上计算的跟模拟的焦深相符合。

3 性质分析

下面考虑聚焦的焦斑宽度和焦深。焦斑宽度指的是结构后光强最大处在 x 方向的半峰全宽。讨论凸三角形中波导宽度、金属层厚度和凸三角形锐度对焦深和焦斑宽度的影响。

首先考虑波导宽度对焦斑宽度和焦深的影响。通过 FDTD 方法模拟计算了不同波导宽度,光场聚

焦情况,保持 $m = \pm 14$, $p = 200$ nm, $\alpha = 90^\circ$, $h = 4000$ nm 不变,如图 4 所示。随着波导宽度增大,聚焦光束的焦斑宽度和焦深增加。当波导宽度 $w = 60 \sim 80$ nm,焦斑宽度小于入射波长,焦深在 $4 \sim 6$ μm 。波导宽度 $w = 80 \sim 140$ nm,光束聚焦的焦斑宽度出现明显增大,焦斑宽度在 $0.6 \sim 0.9$ μm ,聚焦光斑的焦深可达到 12 μm 。当增大波导的宽度时,由(1)式可知,波导有效折射率减小。根据(10)式可知相邻波导的聚焦高度增大,焦深长度也增加。

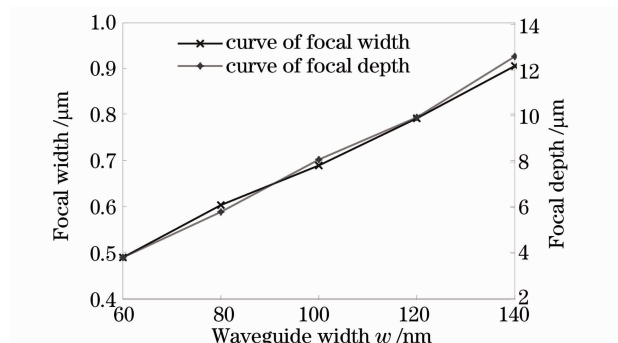


图 4 不同波导宽度的焦斑宽度和焦深

Fig. 4 Focal widths and depths with different width of waveguide

然后模拟计算金属板厚度对透射光场的影响。保持 $m = \pm 14$, $p = 200$ nm, $w = 100$ nm, $\alpha = 90^\circ$ 不变,不同金属板厚度,聚焦光束的焦深和焦斑宽度如图 5 所示。结构厚度对聚焦影响并不十分明显,焦斑宽度和焦深基本上分别约在 0.7 μm 和 8.0 μm 。产生这种现象的主要原因:金属板厚度改变,相邻波导的相位差不变,焦斑宽度和焦深变化不明显。

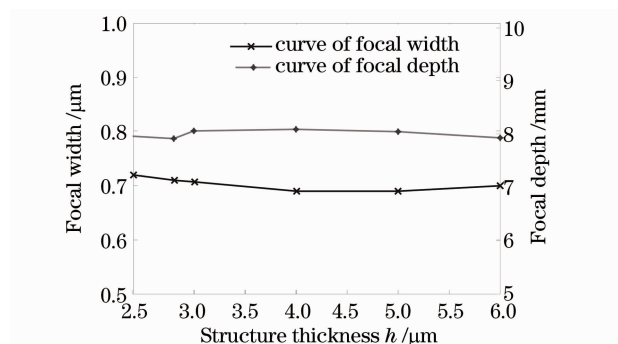


图 5 不同结构厚度的焦斑宽度和焦深

Fig. 5 Focal widths and depths with different thickness structures

考虑凸三角形的锐度对聚焦的影响。结构参数 $m = \pm 14$, $p = 200$ nm, $w = 100$ nm, $h = 4000$ nm 不变,在不同锐度下,光束聚焦变化如图 6 所示。焦斑宽度和焦深随着锐度的增大而增大。当 $60^\circ < \alpha \leq 80^\circ$ 时,焦斑宽度小于波长,焦深在 $3.7 \sim 6.2$ μm 之

间变化;当 $80^\circ < \alpha < 120^\circ$ 时,焦斑宽度在 $0.59 \sim 1$ μm ,焦深在 $6.2 \sim 13.0$ μm 之间。凸三角形的锐度增加,波导长度差 d 减小,引起相邻波导阵列结构中产生相位差减小,根据(10)式,聚焦高度增加,焦深增加。

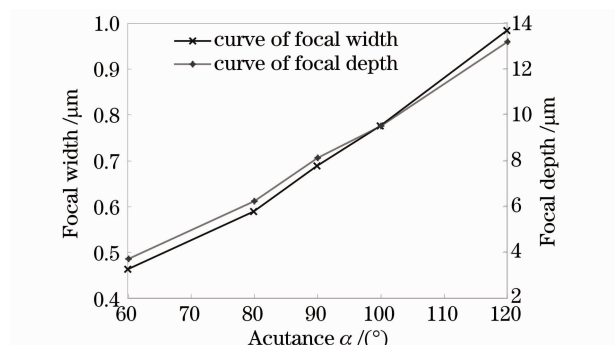


图 6 凸三角形不同锐度的焦斑宽度和焦深

Fig. 6 Focal widths and focal depths with different convex triangle's sharpness

4 凹三角形波导阵列分束器件

利用波导有效折射率引起出射波的相位延迟特性,设计一种凹三角形金属亚波长波导阵列结构的分束器件,结构如图 7(a)所示,凹三角形金属板上刻有亚波长波导,整个金属银结构置于真空中,在图 7中,白色区域为真空,黑色区域为金属银。 α 为凹三角形的出射面锐度, w_1 为中央波导宽度, w_2 为两侧排列的波导宽度,波导数目 m 从中央波导向两侧依次排列 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ 。通过 FDTD 的模拟,调节参数可以实现光束分束。保持两侧波导宽度、三角形锐度、金属板厚度和波导数目分别为: $w_2 = 100$ nm, $\alpha = 120^\circ$, $p = 200$ nm, $m = \pm 10$ 。得到不同中央宽度对应光场强度如图 7(b), (c)所示。发现中央波导宽度为 150 nm,凹三角形金属亚波长波导阵列结构的透射场出现明显分束现象。

通过研究凹三角形波导阵列中波导数目对分束的影响。选定结构参数为: $p = 200$ nm, $\alpha = 90^\circ$, $h = 4000$ nm, $w_1 = 150$ nm, $w_2 = 100$ nm, $d = 200$ nm,两侧的波导数目为: $m = 2, 4, 6, 10$ 的光场如图 8 所示。增加波导数目,出现明显的分束现象。

5 结 论

运用波导理论和 FDTD 方法,对光波通过前凸波导阵列和后凹波导阵列结构进行了分析和模拟。结果表明,前凸波导阵列结构可以实现光波聚焦且焦深可控;后凹波导阵列结构可以实现光波分束。

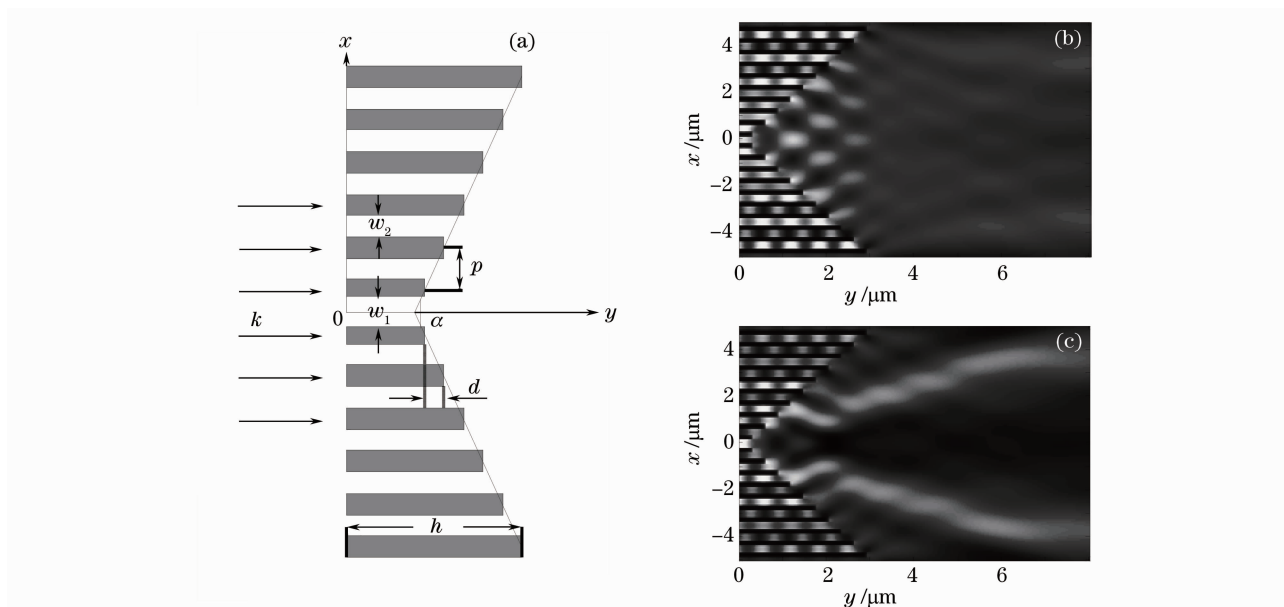


图7 凹三角形金属亚波长波导阵列结构和分束。(a)凹三角形金属亚波长波导阵列,(b) $\tau_1 = 100$ nm, (c) $\tau_1 = 150$ nm
Fig. 7 Structure and beam splitting in concave triangular metal subwavelength waveguide array. (a) concave triangular metal subwavelength waveguide array, (b) $\tau_1 = 100$ nm, (c) $\tau_1 = 150$ nm

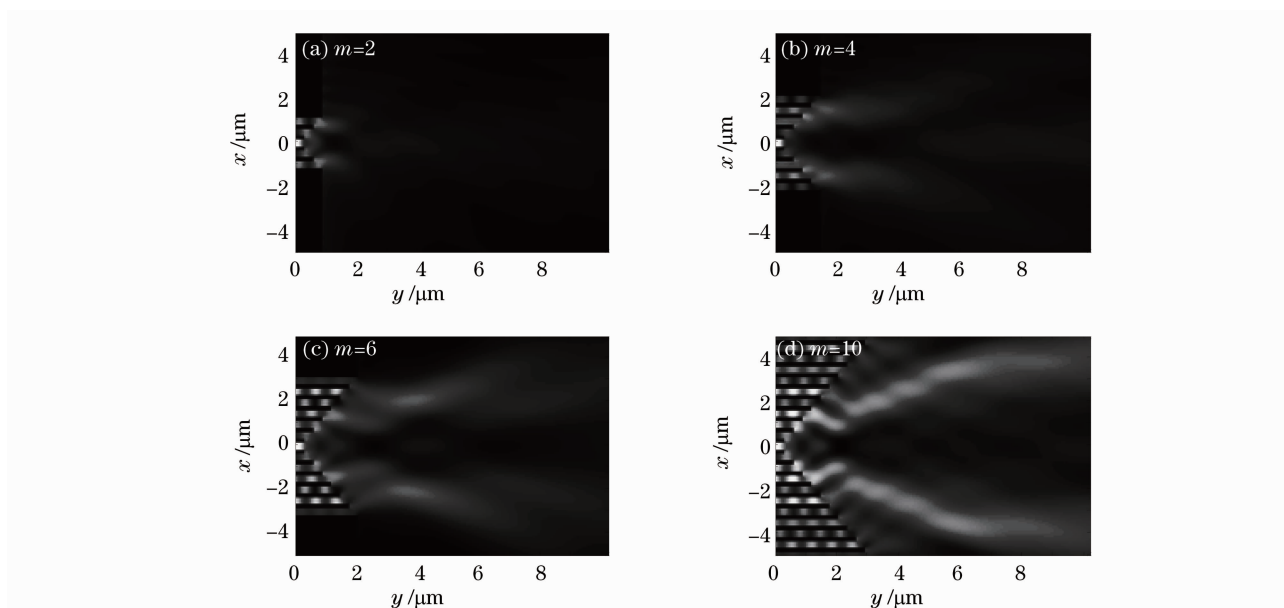


图8 不同波导数目的光场

Fig. 8 Light fields with different waveguide number

对于前凸波导阵列,波导数目增加,焦深增加;增大波导宽度和三角形锐度,焦深和焦斑宽度增加,而焦深和焦斑宽度与结构厚度无关。对于后凹波导阵列,增大中央波导宽度,透射光分成两束;增加波导数目,出现明显分束现象。

参 考 文 献

- 1 H. A. Bethe. Theory of diffraction by small holes[J]. *Phys. Rev.*, 1944, **66**(7): 163~182
- 2 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*.

Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, **391**: 667~669

- 3 H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux *et al.*. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. *Science*, 2002, **297** (5582): 820~822

- 4 Yan Feng, Zhou Ming, Fan Xiaomeng *et al.*. Near-field nanofabrication technology base on local field enhancement effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 176~180

言峰,周明,范晓萌等.基于局域场加强的近场纳米加工技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 176~180

- 5 Zeng Xiahui, Fan Dianyan, Zhou Ping. Field distributions and transmission property inside a conical-waveguide with a sub-wavelength-sized exit hole[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6):

- 1487~1492
曾夏辉, 范滇元, 周 萍. 亚波长锥形波导的电磁场分布及传输特性[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1487~1492
- 6 Kim Seyoon, Lim Yongjun, Kim Hwi *et al.*. Optical beam focusing by a single subwavelength metal slit surrounded by chirped dielectric surface gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(1): 013103-1~3
- 7 F. J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno, H. J. Lezec *et al.*. Focusing light with a single subwavelength aperture flanked by surface corrugations [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(22): 4500~4502
- 8 Song Guofeng, Wang Weimin, Cai Likang *et al.*. Sub-wavelength beam lasers with surface plasmon structures [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(7): 5105~5109
宋国锋, 汪卫敏, 蔡利康 等. 表面等离子激元调制的亚波长束斑半导体激光器[J]. 物理学报, 2010, **59**(7): 5105~5109
- 9 Ye Xin, Jiang Xiaodong, Zhang Jicheng *et al.*. Research development of subwavelength antireflection gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 60501
叶 鑫, 蒋晓东, 张继成 等. 亚波长减反射光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(6): 60501-1~8
- 10 Xu Jiying, Wang Jia, Tian Qian. Research on near-field local enhancement properties of step-shaped nano-aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1381~1387
许吉英, 王 佳, 田 芊. 阶梯型纳米孔径的近场光学局域增强特性研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1381~1387
- 11 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357
杨一粟, 黄永清, 黄 辉 等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2352~2357
- 12 W. M. Saj. Light focusing on a stack of metal-insulator-metal waveguides sharp edge [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13615~13623
- 13 Shinji Kameda, Mizutani Akio, Kikuta Hisao. Numerical study on a micro prism and micro lenses with metal-dielectric multilayered structures [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(4): 749~756
- 14 Dawoon Choi, Lim Yongjun, Roh Sookyoung *et al.*. Optical beam focusing with a metal slit array arranged along a semicircular surface an its optimization with a genetic algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(7): A30~A34
- 15 I. P. Kaminow, W. L. Mammel, H. P. Weber. Metal-clad optical waveguides: analytical and experimental study [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 396~405
- 16 Wang Bing, Wang Guoping. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(1): 013107-1~3
- 17 Pannipitiya Asanka, D. Rukhlenko Ivan, Malin Premaratne *et al.*. Improved transmission model for metal-dielectric-metal plasmonic waveguides with stub structure [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 6191~6204
- 18 E. N. Economou. Surface plasmons in thin films [J]. *Phys. Rev.*, 1969, **182**(2): 539~554
- 19 S. I. Bozhevolnyi. Plasmonic Nanoguides and Circuits [M]. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2009. 149~150
- 20 L. M. Moreno, F. J. Garcia-Vida. Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(16): 167401-1~4
- 21 Dong Hongcheng, Liu Yang, Yi Kui *et al.*. Theory analysis of polarized beam coherent combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2346~2351
董洪成, 刘 阳, 易 葵 等. 偏振光束相干合成的理论分析[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2346~2351
- 22 K. S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell's equation in isotropic media [J]. *IEEE. Antennas Propagat.*, 1966, **14**(3): 302~307
- 23 Wang Jingquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou *et al.*. Implementation of coherent array beam combination using two-dimensional sine phase grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 39~43
王景全, 方 亮, 张志友 等. 用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 39~43
- 24 Wang Hui, Zeng Wei, Song Guofeng. Simulation and development of subwavelength periodic hole array on Au film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1638~1643
王 卉, 曾 韡, 宋国峰. 金膜上亚波长周期性孔阵的模拟与研制[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1638~1643
- 25 Roland Muller, Viktor Malyarchuk, Christoph Lienauller. Three-dimensional theory on light-induced near-field dynamics in a metal film with a periodic array of nanoholes [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(20): 205415-1~9
- 26 F. I. Baida, D. Van Labeke. Three-dimensional structures for enhanced transmission through a metallic film: annular aperture arrays [J]. *Phys. Rev. B.*, 2003, **67**(15): 155314-1~7