

金属波导阵列聚焦和分束器的设计

胡雪瑶 陈跃刚 吴次南

(贵州大学物理系, 贵州 贵阳 550025)

摘要 由于光在不同长度的波导中传输时出现不同的相位延迟, 特定的波导阵列可以对光波波阵面进行调制。通过理论推导发现左右两边带有凸出三角形的波导阵列结构可以实现光波场的聚焦。利用时域有限差分法模拟了左右两边带有凸出三角形的波导阵列对光波的聚焦情况, 找出在波导厚度 $h=6000$ nm, 波导长度差 $d=100$ nm, 波导数目 $m=10$, 波导宽度 $w=100$ nm 时聚焦效果最好, 同时通过研究不同参数对该结构的聚焦特性的影响, 找出该结构具有利用价值的性质。此外, 通过模拟发现前凹三角形金属波导阵列结构在波导宽度 $w_2=80$ nm, 中央波导宽度 $w_1=150$ nm, 波导长度差 $d=200$ nm, 波导厚度 $h=4400$ nm, 波导数目 $m=8$ 时能实现光波场的分束。

关键词 光学器件; 聚焦; 分束; 波导阵列; 时域差分法; 金属波导结构

中图分类号 O484.4; TN25; TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.122301

Focusing and Beam Splitting with Metal Waveguide Array

Hu Xueyao Chen Yuegang Wu Cinan

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

Abstract Due to the difference in phase delay of light wave propagating through waveguides with different lengths, wave front can be modulated by waveguide array. Based on theoretical derivation, it is found that metal waveguide array with convex triangle in left and right sides can focus light wave. Using the finite-difference time-domain method, the focusing in metal waveguide array with convex triangle in left and right sides is simulated. It is found that when the thickness of waveguide $h=6000$ nm, the difference in waveguide length $d=100$ nm, the waveguide number $m=10$, and the waveguide width $w=100$ nm, the metal waveguide array has better focusing performance. Some valuable characteristics of such a structure are also found by investigating the of different framework parameters on its focusing properties. Simulations also indicate that when the waveguide width $w_2=80$ nm, the central waveguide width $w_1=150$ nm, the difference in waveguide length $d=200$ nm, the thickness of the waveguide $h=4400$ nm, and the waveguide number $m=8$, the concave triangular waveguide array can realize beam splitting.

Key words optical devices; focusing; beam splitting; waveguide array; finite-difference time-domain method; metal waveguide structure

OCIS codes 230.7370; 310.6628; 230.1360; 240.6680

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与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]。2003年, Garcia-Vidal等^[2]发现, 利用表面带有凹槽的单一亚波长缝隙的结构, 在远场区可以看到一个高准直的低发散的光束, 同时在中场区出现一个伸长了的聚焦斑。2006年, Fan等^[3]发现纳米级金属波导阵列结构的光的入射面上有凹陷, 同时当在此结构内有表面等离子场分布时会出现聚光现象。2009年, Saj^[4]发现在出射面是尖角的结构中, 用空气充当绝缘体, 入射光平行于金属平面入射, 就会在出射端出现聚焦现象。2010年, Choi等^[5]研究发现, 在一种半圆形的金属层上刻制亚波长波导阵列狭缝, 也具有聚焦的特性。

本文研究由金属 Ag 构成的左右两边带有凸出三角形的波导阵列及前凹三角形波导阵列结构对光束的

收稿日期: 2013-06-20; 收到修改稿日期: 2013-08-16; 网络出版日期: 2013-11-07

作者简介: 胡雪瑶(1987—), 女, 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: 814059200@qq.com

导师简介: 吴次南(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事光谱方面的研究。

控制。由于光波在不同长度的波导阵列中传播产生不同的相位延迟,因此当各个波导中出射的光波在某点的相位差为 2π 的整数倍时,就能实现聚焦。通过时域有限差分(FDTD)法模拟研究三角形的锐度、金属的厚度、波导宽度等参数对光波的聚焦或分束性质的影响。根据聚焦或分束情况的变化规律,通过调节各个参数可以设计出两边带有凸出三角形的波导阵列聚焦器件以及前凹的波导阵列分束器件。

2 理 论

2.1 波导结构对有效折射率的影响

一般波导是由金属-介质-金属三层周期性叠加而构成的,波导的基模平均有效折射率与波导结构的金属内壁和介质都有关系,而且对称性金属波导表面等离子体激元的有效折射率随波导宽度的增加而减小^[6-9]。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

$$n_{\text{eff}} = \beta/k_0, \quad k_0 = 2\pi/\lambda, \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_d} = \frac{k}{q} = \frac{1 + \exp(k\tau\omega)}{1 - \exp(k\tau\omega)}, \quad q = k_0 \sqrt{(\beta/k_0)^2 - \epsilon_m}, \quad k = k_0 \sqrt{(\beta/k_0)^2 - \epsilon_d}, \quad (2)$$

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, $\tau\omega$ 是波导的宽度, k 是入射波数。根据(1),(2)式可以得出波导有效折射率与波导宽度的关系:

$$\tau\omega = \frac{1}{k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d}} \times \ln \left[1 - \frac{2}{1 + \frac{\epsilon_m}{\epsilon_d} \sqrt{1 - \frac{\epsilon_d - \epsilon_m}{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m}}} \right]. \quad (3)$$

由(3)式可知有效折射率随波导宽度的增加而减小。

2.2 焦斑高度的计算

设计出一种两边带有三角形凸出的波导阵列的聚焦器件,结构如图1所示。图中黑色区域代表金属 Ag,白色区域代表真空, p 为 y 方向上两边带有三角形凸出的波导阵列的周期, τ 为 y 方向上的波导宽度, h 为波导阵列在 x 方向上的厚度,波导顺序 m 为从波导阵列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, a 为两个凸三角形的锐度, f 为聚焦高度。由于两边带有三角形凸出的波导长度不同,光波在通过波导传播时其相位延迟也不同^[10],在由中间向两侧扩展的过程中波导的长度减小,它产生的相位延迟就会减小^[11]。根据惠更斯-菲涅耳原理,每个波导的出射端都可视为一个新的次波源 S,其第 m 个波导发出的光波传播到相距 r 的光轴上 x 点的相位延迟为

$$\Delta\varphi_2(m) = k_0 n_0 r = \sqrt{f^2 + y(m)^2}, \quad (4)$$

式中聚焦高度 f 也就是聚焦斑的位置与光的出射面间的距离, $y(m)$ 为第 m 个波导与 x 轴间的距离。各个次波源 S 发出的光波在 O 点处相干叠加。当波导结构中相邻波导的相位差满足

$$\Delta\varphi_1(m+1) + \Delta\varphi_2(m+1) = \Delta\varphi_1(m) + \Delta\varphi_2(m) + 2N\pi, \quad (5)$$

时,就会在 O 点处出现聚焦,其中 N 为整数。当 $N=0$ 时,根据(5)式可得任意两个相邻波导的聚焦高度

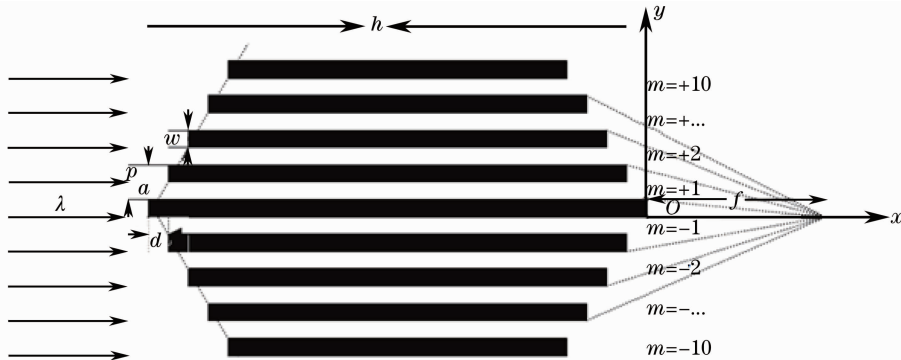


图1 两边带有凸出的三角形的金属波导阵列结构

Fig.1 Structure of metal waveguide array with convex triangles in left and right sides

$$f = \frac{\sqrt{(X+Y-S^2)^2 - 4XY}}{2S}, \quad X = \left(\frac{2m+1}{2}p\right)^2, \quad Y = \left(\frac{2m-1}{2}p\right)^2, \quad S = (n_{\text{eff}} - n_0)d.$$

根据上式,如果选定结构参数 p, h, w 的值,就可以计算出波导阵列结构的相邻波导聚焦高度。

3 模拟结果

3.1 不同结构参数对聚焦的影响

聚焦的好坏与波导阵列结构的结构参数有着密切的关系。在焦斑中焦深是指第 1,2 个波导的聚焦高度与第 $m, m+1$ 个波导的聚焦高度之差,焦斑宽度指的是结构后光强最大处在 y 方向的半峰全宽。现在研究两边带有三角形凸出的波导阵列的金属波导宽度对焦斑的影响。通过 FDTD 方法^[12-13]模拟计算不同金属波导宽度时的光波聚焦情况,选定参数 $p=200 \text{ nm}, h=6500 \text{ nm}, d=100 \text{ nm}, m=\pm 8$ 。金属波导宽度不同时,光波场聚焦情况不同,如图 2 所示。聚焦效果在 $w=100 \text{ nm}$ 时是最好的,当 $w=80 \text{ nm}$ 和 120 nm 聚焦效果明显变差,所以选择 $w=100 \text{ nm}$ 为聚焦最佳条件。

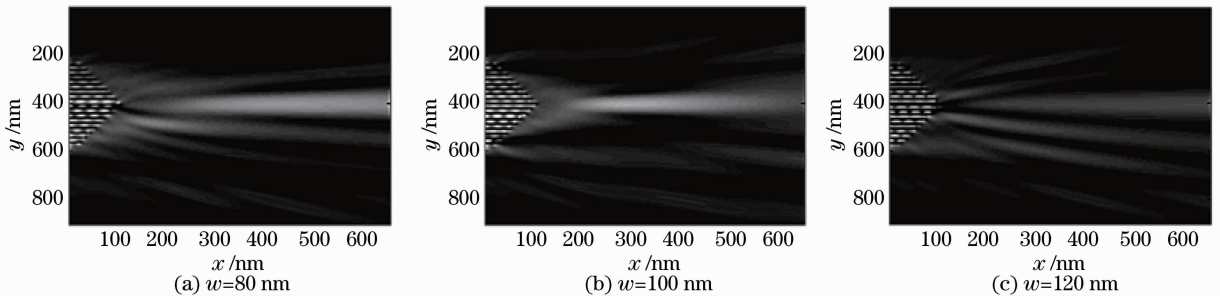


图 2 不同波导宽度下的聚焦

Fig. 2 Focusing with different widths of waveguide

然后模拟计算两边的三角形的锐度对光场聚焦的影响。保持 $p=200 \text{ nm}, w=100 \text{ nm}, h=6500 \text{ nm}, m=\pm 8$ 不变,改变两边的三角形的锐度(即改变相邻波导的长度差 d),聚焦斑如图 3 所示。从图 3 可以看出 $d=100 \text{ nm}$ 时光波的聚焦效果是最好的。

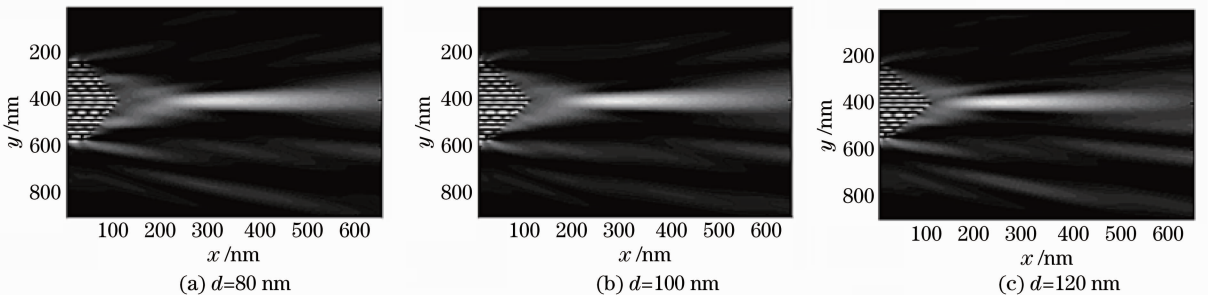


图 3 凸三角形不同锐度时的聚焦

Fig. 3 Focusing with different sharpnesses of convex triangles

考虑金属板厚度对经过波导结构的光场的聚焦的影响,保持 $p=200 \text{ nm}, w=100 \text{ nm}, d=100 \text{ nm}, m=\pm 8$ 不变,不同金属板厚度下光波的聚焦情况如图 4 所示。从图中可以看出随着厚度 h 的增加,聚焦光斑的强度较小,但就聚焦效果而言 $h=6000 \text{ nm}$ 时最好。

下面模拟研究波导阵列数目对聚焦的影响。选定结构参数为 $p=200 \text{ nm}, w=100 \text{ nm}, d=100 \text{ nm}, h=6500 \text{ nm}$ 不变,在不同的波导数目下,光波聚焦的情况如图 5 所示。在波导数 $m=10$ 的时候聚焦效果最好,随着波导数目的增加,聚焦光斑的强度增加,聚焦高度变大,在波导数目不大于 10 时,随着波导数目的增加聚焦效果越来越好。

3.2 凹三角形波导阵列的分束器件

利用波导有效折射率引起出射波发生相位延迟的特性,设计出了一种凹三角形金属波导阵列结构分束

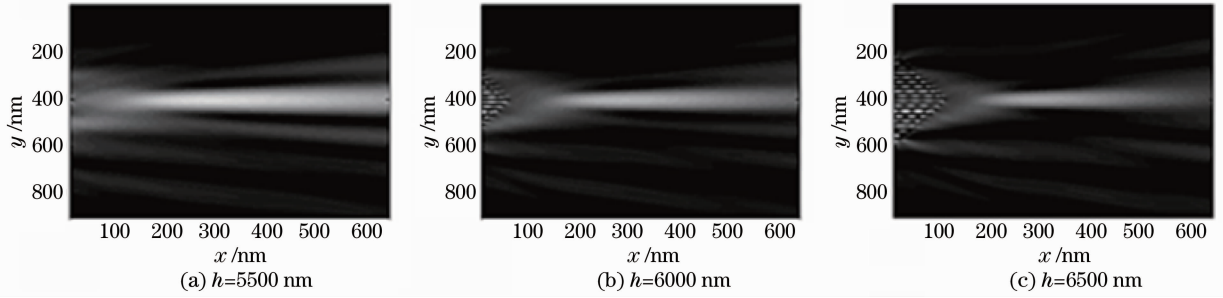


图 4 不同结构厚度下的聚焦情况

Fig. 4 Focusing with different thicknesses of the structure

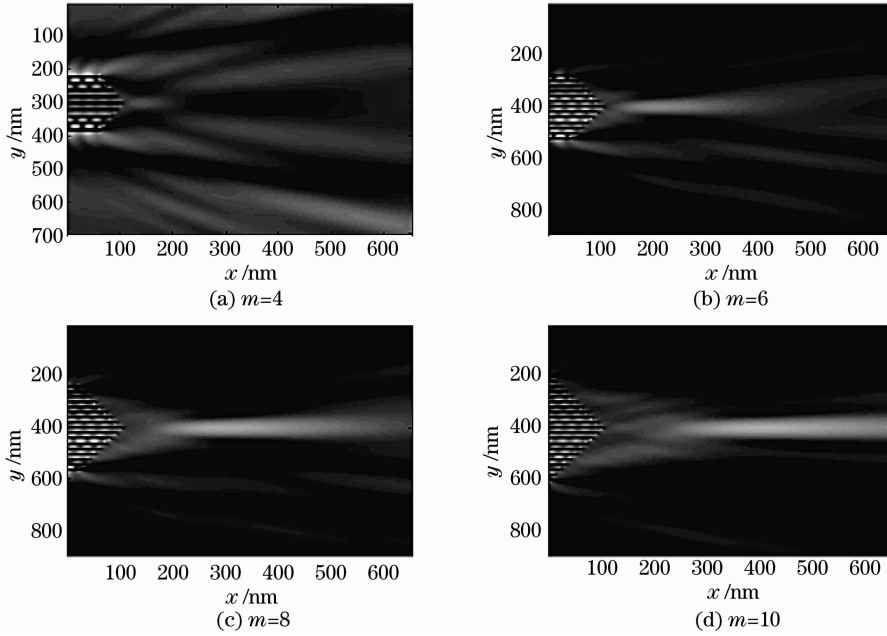


图 5 不同波导数目下的聚焦情况

Fig. 5 Focusing with different waveguide numbers

器件,结构如图 6 所示,在凹三角形金属板上刻上波导,然后将整个金属波导结构置于真空中。在图 6 中,白色区域为真空,黑色区域为金属。 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的分束。

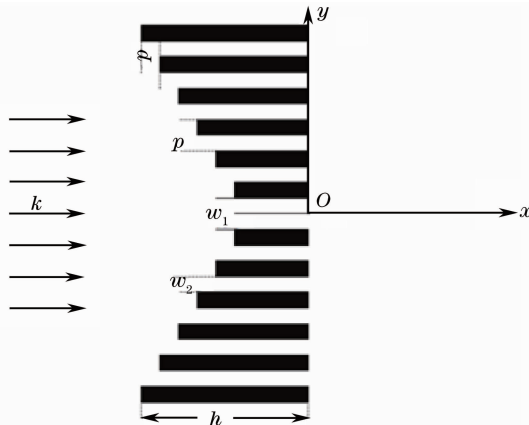


图 6 凹三角形金属亚波长波导阵列结构

Fig. 6 Structure of concave triangular metal sub-wavelength waveguide array

考虑中央波导宽度对凹三角形波导阵列结构分束的影响。保持波导厚度、两侧波导宽度、三角形的角度、金属厚度和波导数目分别为 $h=3000$ nm, $\omega_2=100$ nm, $d=200$ nm, $p=200$ nm, $m=\pm 8$, 得到不同中央宽度对应的光场分布, 如图 7 所示。发现中央波导宽度为 150 nm 的凹三角形金属波导阵列结构的透射场的分束效果最好。

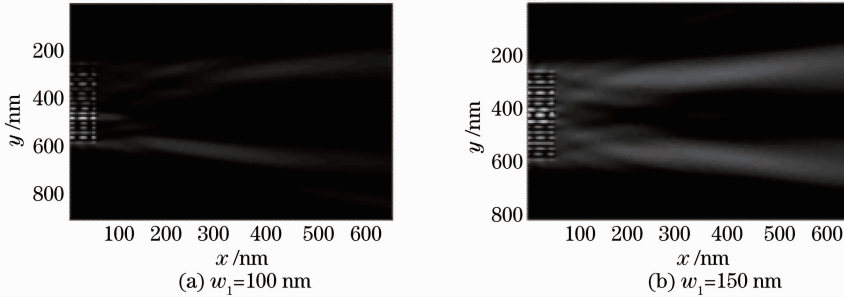


图 7 不同中央波导宽度时的分束

Fig. 7 Beam splitting with different middle widths of waveguide

下面研究波导数目对凹三角形波导结构分束的影响。选定结构参数为 $p=200$ nm, $d=200$ nm, $\omega_1=150$ nm, $\omega_2=100$ nm, $h=4400$ nm, 两侧的波导数目为 $m=6, 8, 10$ 的光场分布如图 8 所示。波导数目 m 从 6 增加到 8 时, 分束效果明显变好, 波导数目再增大时, 分束效果就开始变差, 波导数目 $m=8$ 时分束现象是最好的。

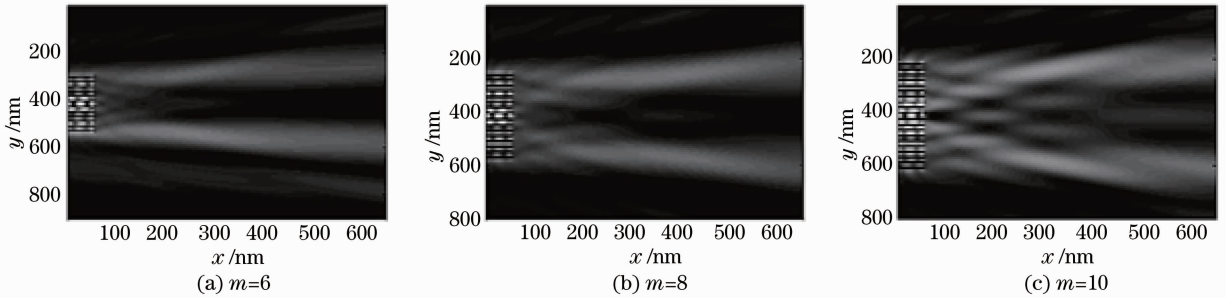


图 8 不同波导数目下的分束

Fig. 8 Beam splitting with different waveguide numbers

研究波导厚度对凹三角形波导结构分束的影响。选定结构参数为 $p=200$ nm, $d=200$ nm, $\omega_1=150$ nm, $\omega_2=100$ nm, $m=8$, 波导厚度 $h=4200, 4400, 4600$ nm 的光波场在出射面的分布如图 9 所示。随着波导厚度的增加, 分束效果发生明显的变化, 当波导厚度从 4200 nm 变到 4400 nm 时, 光斑的光强度明显增强, 分束的效果越来越好, 波导厚度为 4400 nm 时结构的分束效果是最好的, 厚度再增加时分束效果就开始变差了。

研究波导长度差对凹三角形波导结构分束的影响。选定结构参数为 $p=200$ nm, $\omega_1=150$ nm, $\omega_2=100$ nm, $m=8$ 。波导长度差 $d=100, 150, 200$ nm 时对应的光场分布如图 10 所示。随着波导长度差的增

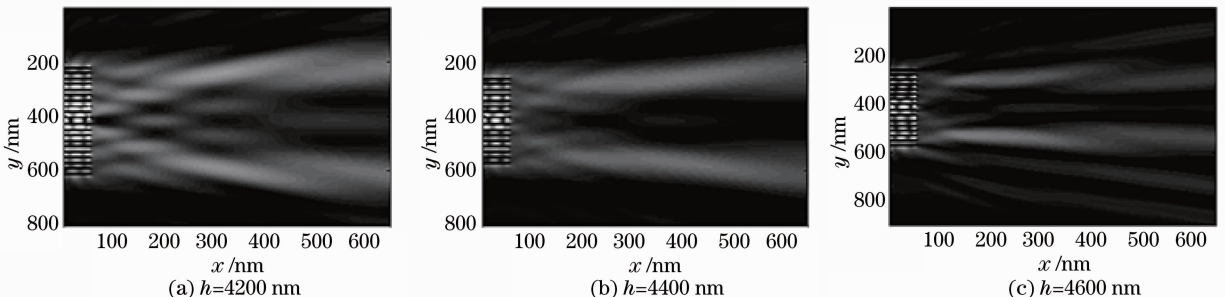


图 9 不同波导厚度下的分束

Fig. 9 Beam splitting with different thicknesses of the structure

加,光场的分束发生了明显的变化。波导长度差从 100 nm 变到 200 nm 的过程中分束效果明显变好, $d=200$ nm 时结构的分束效果最好。

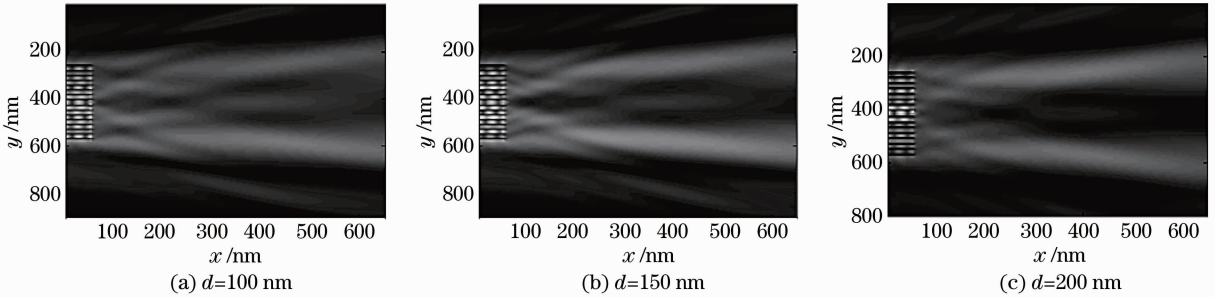


图 10 不同锐度下的分束

Fig. 10 Beam splitting with different sharpnesses of concave triangles

研究波导宽度对凹三角形波导结构分束的影响。选定结构参数为 $p=200$ nm, $d=200$ nm, $\omega_1=150$ nm, $m=8$, 波导宽度 $\omega_2=60, 80, 100$ nm 时对应的光场分布如图 11 所示。随着波导宽度的增加,光场的分束发生了明显的变化。波导宽度从 60 nm 变到 80 nm 的过程中分束效果明显变好, $\omega_2=80$ nm 时结构的分束效果最好;再增厚时分束效果明显变差。

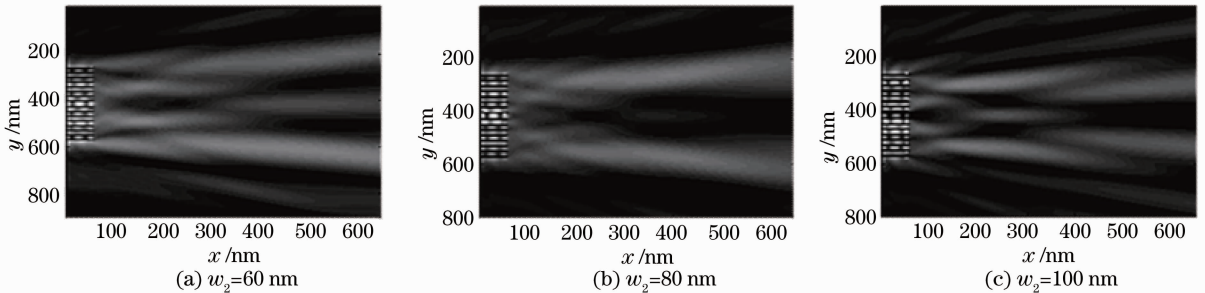


图 11 不同波导宽度下的分束

Fig. 11 Beam splitting with different widths of waveguide

4 结 论

运用波导理论和 FDTD 方法,对光波通过两边带有凸出三角形的波导阵列和前凹波导阵列结构进行了分析和模拟。结果表明,两边带有凸出三角形的波导阵列结构可以实现光波的聚焦,而且聚焦高度可以通过结构的几何参数控制,聚焦斑的位置可以通过改变光出射面的波导的几何参数来改变,当波导厚度 $h=6000$ nm,波导长度差 $d=100$ nm,波导数目 $m=10$,波导宽度 $\omega=100$ nm 时聚焦效果是最好的。前凹金属波导阵列结构在波导宽度 $\omega_2=80$ nm,中央波导宽度 $\omega_1=150$ nm,波导长度差 $d=200$ nm,波导厚度 $h=4400$ nm,波导数目 $m=8$ 时可以很好地实现光波的分束,对于前凹波导阵列,波导厚度、波导的锐度和波导数目都会影响分束的效果。

参 考 文 献

- 1 H A Bethe. Theory of diffraction by small holes [J]. Phys Rev, 1944, 66(7): 163–182.
- 2 F J Garcia-Vidala, 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.
- 3 Xiebin Fan, Guo Ping Wang. Nanoscale metal waveguide arrays as plasmon lenses [J]. Opt Lett, 2006, 31(9): 1322–1324.
- 4 W M Saj. Light focusing on a stack of metal-insulator-metal waveguides sharp edge [J]. Opt Express, 2009, 17(16): 13615–13623.
- 5 Dawoon Choi, Lim Yongjun, Roh Sookyoung, *et al.*. Optical beam focusing with a metal slit array arranged along a semicircular surface and its optimization with a genetic algorithm [J]. Appl Opt, 2010, 49(7): A30–A34.

- 6 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.
- 7 Wang Bing, Wang Guoping. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(1): 013107.
- 8 Asanka Pannipitiya, Ivan D Rukhlenko, Malin Premaratne, *et al.*. Improved transmission model for metal-dielectric-metal plasmonic waveguides with stub structure [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 6191—6204.
- 9 E N Economou. Surface plasmons in thin films [J]. *Phys Rev*, 1969, 182(2): 539—554.
- 10 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.
- 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 Wang Jingquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou, *et al.*. Implementation of coherent array beam combination using twodimensional 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.
- 13 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.