

利用双参数六角棱镜干涉法设计渐变光子晶体透镜阵列

孙晓红*, 武凡, 王帅蒙, 齐勇乐, 曾勇

郑州大学信息工程学院河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450001

摘要 设计了一个无顶六角棱镜, 该棱镜的六个侧面分为 3+3 两组, 每组与棱镜底面夹角不同。扩束后的平面波经棱镜六个侧面折射后产生干涉光场图案, 干涉图案对应双周期渐变光子晶体超晶格结构, 利用光敏介质记录该结构即可得到渐变光子晶体透镜阵列。通过调整棱镜两组侧面与底面夹角、两组光束的振幅对比度等参量, 可以设计阵列周期、渐变梯度、中心与边缘折射率差不同的透镜及阵列结构。本研究可为渐变透镜在光互联、光集成、光耦合、显示及成像方面的应用提供新思路。

关键词 光学设计; 无顶棱镜; 渐变光子晶体; 透镜阵列; 干涉

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0222002

Design of Gradient Photonic Crystal Lens Array Using Two-Parameter Hexagonal Prism Interferometer

Sun Xiaohong*, Wu Fan, Wang Shuaimeng, Qi Yongle, Zeng Yong

Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract In this work, a top-cut hexagonal prism is designed. The six sides of the prism are divided into two equal groups, in which the angles between the side and the bottom of the prism are different. When an expanded plane wave is refracted by the six sides of the prism, the interference pattern can be formed, which is corresponding to a two-period superlattice structure of gradient photonic crystal (GPC). If the interfered pattern is recorded by a photosensitive medium, a GPC lens array is obtained. By adjusting the angle between the side and bottom of the prism and the amplitude contrast of both groups of beams, we can design lenses and arrays with different array periods, gradients, and refractive index differences between the center and edge of each lens. This work provides new applications for gradient lenses in optical interconnection, optical integration, optical coupling, display, and imaging.

Key words optical design; top-cut prism; gradient photonic crystal; lens array; interference

OCIS codes 220.3620; 230.5298; 220.4000

1 引 言

工程上, 通常用渐变光子晶体(GPCs)结构来改变折射率的空间分布, 控制电磁波的传播^[1]。简单的超晶格光子晶体(PC)结构因为对太阳光谱的选择性增强吸收作用, 已经被广泛应用在太阳能热光电器件上^[2-3]。近年来, 研究人员将渐变超晶格 PC 应用在有机发光二极管(OLED)上来提高平面白光 OLED 的提取效率^[4]。实验上, 周期和准周期 PC 可以通过一步全息光刻法大面积、快速地制备^[5-6]。

而双周期超晶格 GPCs 的大面积制作比较困难, 目前报道的方法是利用空间光调制器和干涉光刻技术来实现具有双周期性的 GPCs 结构^[7-9]。基于同样的方法, 其中一个课题组用全息干涉的方法也研制出具有双周期性、双对称性和双基的 GPCs 超晶格结构^[10]。

本课题组长期致力于周期、准周期 PC 的单棱镜全息光刻制作研究, 本文基于课题组前期的工作^[11-13], 设计一个无顶六角棱镜, 棱镜六个侧面分为两组, 与底面夹角不同。利用该棱镜, 通过调整不同

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-09-10; 录用日期: 2019-09-19

基金项目: 河南省重大科技专项(161100210200)

* E-mail: iexhsun@zzu.edu.cn

光束的倾角、光强等参数可以实现不同结构的双周期 GPCs 超晶格,因而制作出具有不同特性参数的微透镜及阵列。

2 双参数无顶六角棱镜设计

双参数无顶六角棱镜系统如图 1 所示,它由两个平行底面和六个侧面(主侧面 1、3、5 和副侧面 2、4、6)组成。棱镜下底面中心为坐标原点,上下底面法线作为 z 轴, x - y 平面平行于棱镜底面。六个侧面分为两组,侧面 1、3、5 与底面夹角相同,标记为主角 φ_1 ,另一组侧面 2、4、6 与底面夹角更大一些,记为副角 φ_2 。当一束扩束激光从棱镜小底面(上底面)入射时,如果棱镜上底面被遮挡,光束会被棱镜

的侧面沿六个不同方向折射。折射光束也相应地被分成两组,一组的波矢为 k_1 、 k_3 和 k_5 ,这组光束被称为主光束,它们与上下底面法线 z 轴的夹角为主角 θ_1 ;而另一组波矢为 k_2 、 k_4 和 k_6 ,这组光束被称为副光束,与 z 轴的夹角为 θ_2 。根据棱镜折射可得 $\theta_1 = \varphi_1 - \arcsin(\varphi_1/n)$ 和 $\theta_2 = \varphi_2 - \arcsin(\varphi_2/n)$,其中 n 为棱镜的折射率。这六束光将在棱镜的下底面发生干涉,干涉光强为

$$I = (E_p + E_m) \times (E_p + E_m)^*, \quad (1)$$

式中: $E_p = A_p \exp(i\mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r})$, $E_m = A_m \exp(i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r})$, $p=1, 3, 5, m=2, 4, 6, A_p$ 为第 p 束光振幅; A_m 为第 m 束光振幅; \mathbf{r} 为位置矢量。两组光束的波矢分别表示为

$$\mathbf{k}_p = \left[k \cos \frac{2(p-1)}{6} \sin \theta_1, k \sin \frac{2(p-1)}{6} \sin \theta_1, k \cos \theta_1 \right], \quad (2)$$

$$\mathbf{k}_m = \left[k \cos \frac{2(m-1)}{6} \sin \theta_2, k \sin \frac{2(m-1)}{6} \sin \theta_2, k \cos \theta_2 \right], \quad (3)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$, λ 为所用激光的波长。

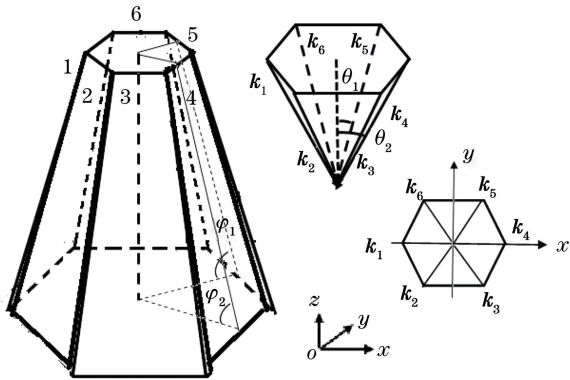


图 1 双参数无顶六角棱镜装置图

Fig. 1 Schematic of two-parameter top-cut hexagonal prism

3 渐变光子晶体透镜阵列设计

3.1 单棱镜干涉法设计 GPC 透镜阵列

把 $\theta_1 = 30^\circ$ ($\varphi_1 = 70^\circ$), $\theta_2 = 32^\circ$ ($\varphi_2 = 72.8^\circ$), $\lambda = 355 \text{ nm}$, $n = 1.48$ 代入(1)、(2)和(3)式,可以得到不同方向的干涉图案,如图 2 所示。图 2(a)、(c)分别是 x - y 和 y - z 平面的干涉图案,图 2(b)、(d)分别是相应的放大图案,图 2(e)、(f)分别是 $x=0$ 时沿 y 轴的光强分布以及 $y=0$ 时沿 z 轴的光强分布。从前四幅图像中,可以看到明显的 GPC 超晶格结构,该结构表现出两种类型的周期性,分别表现为图 2(a)中标出的大周期 l 和图 2(b)中标记的小周期 d 。而且在每一个大周期中,光强都是周期分布的,

从中心到边缘呈逐渐变小的趋势,这个规律从图 2(e)中能更清楚地观察到。从图 2(d)、(f)可以看到在 $-5 \sim 5 \mu\text{m}$ 的厚度范围内,该结构也是呈现出中心到边缘光强逐渐减小的变化趋势。

如果用负型光刻胶记录干涉图案,将得到折射率渐变的六角形透镜及阵列,其 x - y 平面介质柱直径从中心到边缘逐渐减少,而介质柱沿 z 方向是中间粗两边细的圆台形状,这样,每一个透镜 x - y 平面的中心到边缘的折射率减小且透镜 z 方向中心到边缘厚度减小,这有利于透镜聚焦,并能有效地减小器件的尺寸。

利用此六角棱镜系统,可以合理地设计棱镜侧面与底面夹角 φ_1 、 φ_2 ,以调整光束与 z 轴夹角 θ_1 、 θ_2 ,从而改变透镜的间距[图 2(a)中的大周期 l]及透镜中介质柱之间的间距[图 2(b)中的小周期 d]。

3.2 主光束角 θ_1 对透镜结构影响

首先固定增量角 $\theta_2 - \theta_1 = 2^\circ$, 给出光强与 y 和主角 θ_1 之间的变化关系,如图 3 所示。可以看出,随着角度 θ_1 的增大,每一个透镜尺寸或透镜间距(图 3 中两条粗暗纹间的间距或大周期 l)略微增大,变化不明显,而每一个透镜中介质柱(两粗暗纹之间亮条纹)变多且介质柱间距(小周期 d)变小。也就是说,在透镜中心和边缘折射率不变(因为中心和边缘光强不变)的情况下,透镜的折射率调节能力变大。

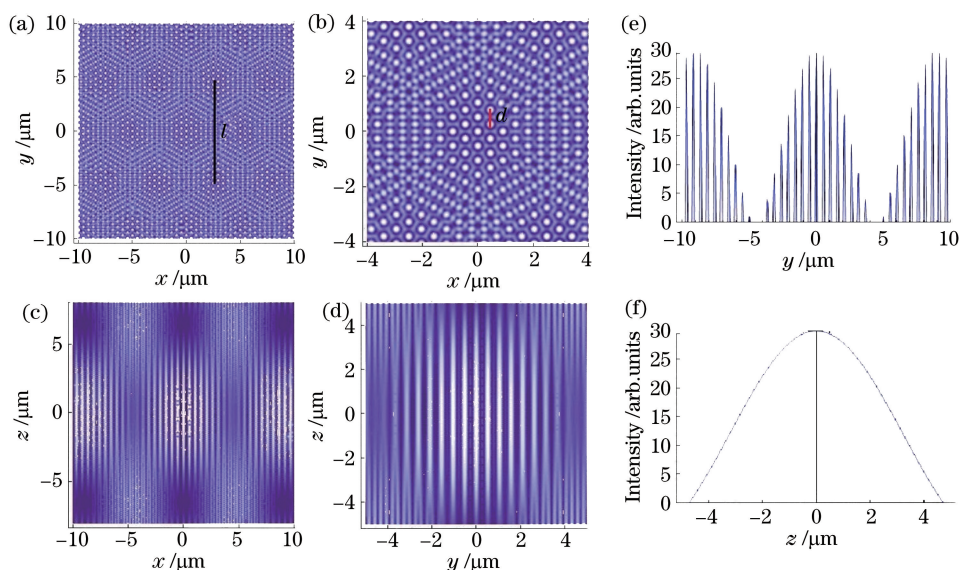


图 2 二维干涉图案、放大图及一维光强分布。(a) x - y 平面二维干涉图案;(b) x - y 平面放大图案;
(c) y - z 平面二维干涉图案;(d) y - z 平面放大图案;(e) y 轴一维光强分布;(f) z 轴一维光强分布

Fig. 2 2D interference patterns, magnification map, and 1D intensity distribution. (a) 2D interference patterns along x - y plane; (b) magnified patterns along x - y plane; (c) 2D interference patterns along y - z plane; (d) magnified patterns along y - z plane; (e) 1D intensity along y -axis; (f) 1D intensity along z -axis

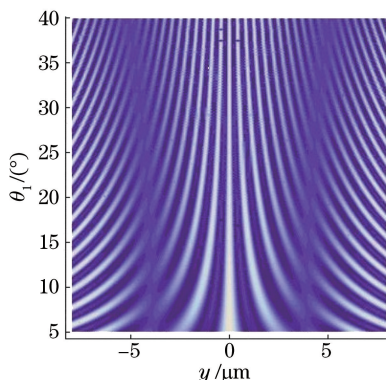


图 3 强度分布随主角 θ_1 和坐标 y 的变化
Fig. 3 Intensity versus main angle θ_1 and y

为了更清楚地研究主角度 θ_1 对透镜结构的影响,对主角取不同值时的 x - y 平面干涉模式进行了分析,如图 4 所示,图 4(a)~(d)分别是主角为 10° 、 20° 、 30° 和 35° ,增量角固定为 2° 时 x - y 平面的干涉模场,图 4(e)~(h)分别是相应的光强随 y 坐标的变化。从图 4 能更清楚地看到,随着主角的增大,每一个透镜中介质柱的个数逐渐增多,柱间距逐渐变小,而且透镜间距有略微增大的趋势。

3.3 增量角 $\theta_2 - \theta_1$ 对透镜阵列结构影响

固定 $\theta_1 = 30^\circ$,通过改变增量角 $\theta_2 - \theta_1$,给出了 y 方向上干涉模式的变化,如图 5 所示。从图 5 可以看到,随着增量角的变化,透镜尺寸 l (两粗暗纹间的间距)逐渐变小,而且每个透镜中所包含的介质柱(亮条纹)数目逐渐减少,但介质柱间距基本不变。

为了更清楚地观察增量角对干涉模式及晶格周期的影响,给出了增量角分别为 0° 、 1° 、 2° 、 3° 情况下 x - y 平面干涉模式以及光强沿 y 轴的分布,如图 6 所示。从图 6 能更清晰地看到,随着增量角的增大,大周期(透镜尺寸或间距)逐渐变小。

在制作梯度透镜结构时,介质柱间距越小,对制作透镜的光刻胶分辨率要求越高,而且棱镜角度 φ_1 的增大(即 θ_1 增大)会使光线在棱镜底面发生全反射,从而使损耗增大,综合考虑以上因素,选定角度 $\theta_1 = 30^\circ$ 。同时考虑棱镜的制作难度($\theta_2 - \theta_1$ 越小,制作难度越大)及透镜的会聚特性,选择增量角为 2° 。

4 光束强度对透镜中心和边缘折射率梯度的影响

选定主角 $\theta_1 = 30^\circ$ 、增量角 $\theta_2 - \theta_1 = 2^\circ$,改变主副光束振幅对比度,研究了透镜中心与边缘折射率(GPC 光强分布)差值的变化,结果如图 7 所示。图 7(a)~(e)给出变化增量为 0.1 时振幅比 A_p/A_m 在 1~1.5 中的光强分布。从图 7 中可以看出,透镜的尺寸与周期性(GPC 结构的尺寸和周期特性)保持不变,而每一个大周期内中心位置的最大光强从 30 增大到 47,增幅超过 0.5。那么,在全息制作过程中,如果材料和曝光时间相同,随着主副光束振幅对比度的增加,所得透镜的中心和边缘折射率差也

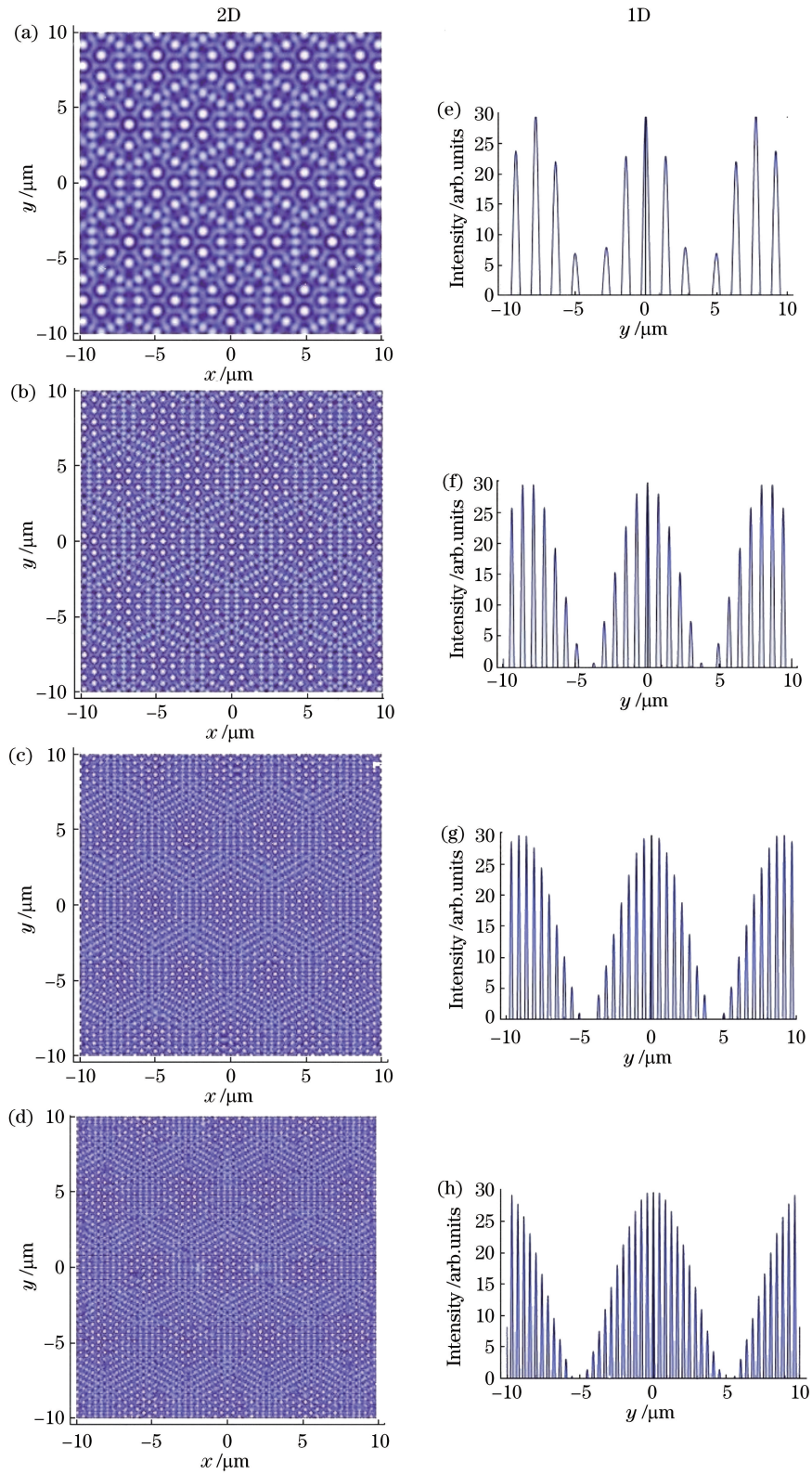


图 4 主角 θ_1 不同时的二维和一维强度分布。(a)(e) $\theta_1 = 10^\circ$; (b)(f) $\theta_1 = 20^\circ$;
(c)(g) $\theta_1 = 30^\circ$; (d)(h) $\theta_1 = 35^\circ$

Fig. 4 2D and 1D intensity distributions at different θ_1 . (a)(e) $\theta_1 = 10^\circ$; (b)(f) $\theta_1 = 20^\circ$;
(c)(g) $\theta_1 = 30^\circ$; (d)(h) $\theta_1 = 35^\circ$

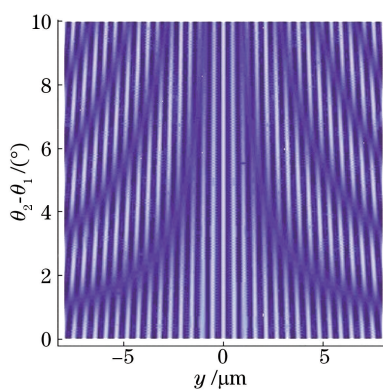


图 5 强度分布随增量角 $\theta_2 - \theta_1$ 和坐标 y 的变化

Fig. 5 Intensity versus $\theta_2 - \theta_1$ and y

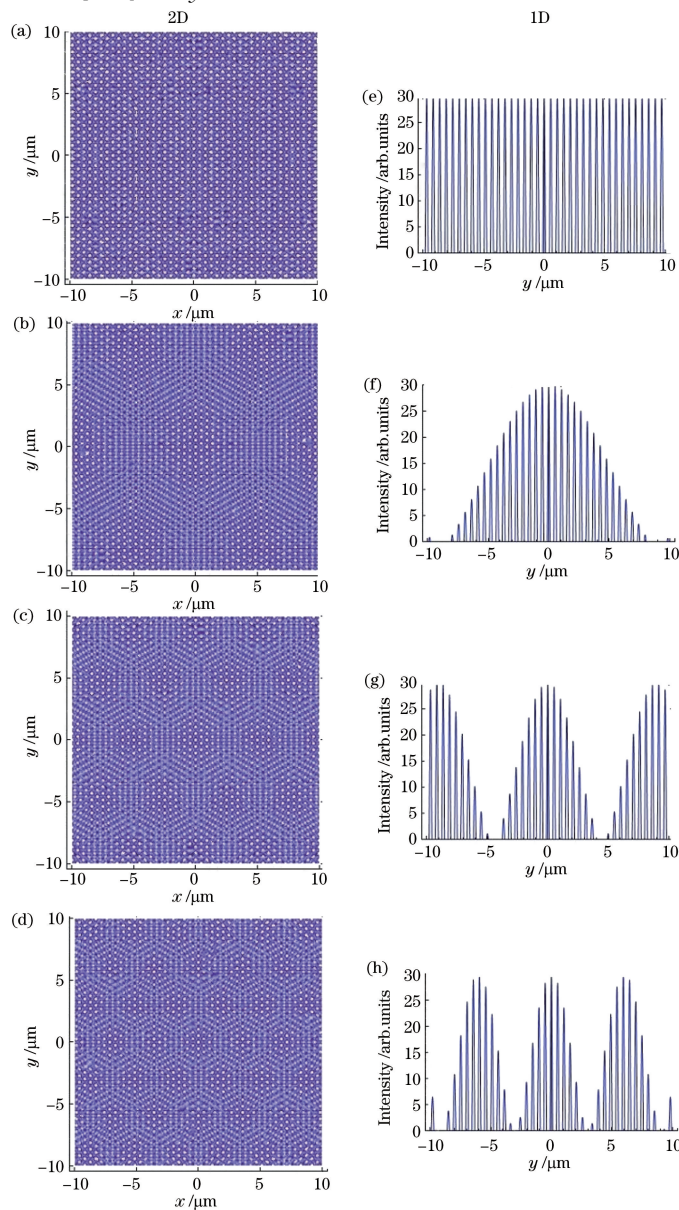


图 6 增量角 $\theta_2 - \theta_1$ 不同时的二维和一维光强分布。(a)(e) $\theta_2 - \theta_1 = 0^\circ$; (b)(f) $\theta_2 - \theta_1 = 1^\circ$;
(c)(g) $\theta_2 - \theta_1 = 2^\circ$; (d)(h) $\theta_2 - \theta_1 = 3^\circ$

Fig. 6 2D and 1D intensity distributions at different $\theta_2 - \theta_1$. (a)(e) $\theta_2 - \theta_1 = 0^\circ$; (b)(f) $\theta_2 - \theta_1 = 1^\circ$;
(c)(g) $\theta_2 - \theta_1 = 2^\circ$; (d)(h) $\theta_2 - \theta_1 = 3^\circ$

会增大。因此,通过调整主副光束振幅可以制作具有不同折射率梯度和相同尺寸的透镜及阵列。

5 结 论

本文设计了一个具有 3+3 两组侧面的双参数无顶六角棱镜,通过调整棱镜两组侧面与底面夹角、光束振幅对比度,设计了晶格周期、阵列周期、光强对比度不同的 GPC 超晶格结构。当主光束角从 10° 增加到 35° 时,超晶格小周期减小为原来的四分之一。增量角从 1° 变化到 3° 时,大周期减少为原来的三分之一。如果用光敏介质记录这些结构,就可以

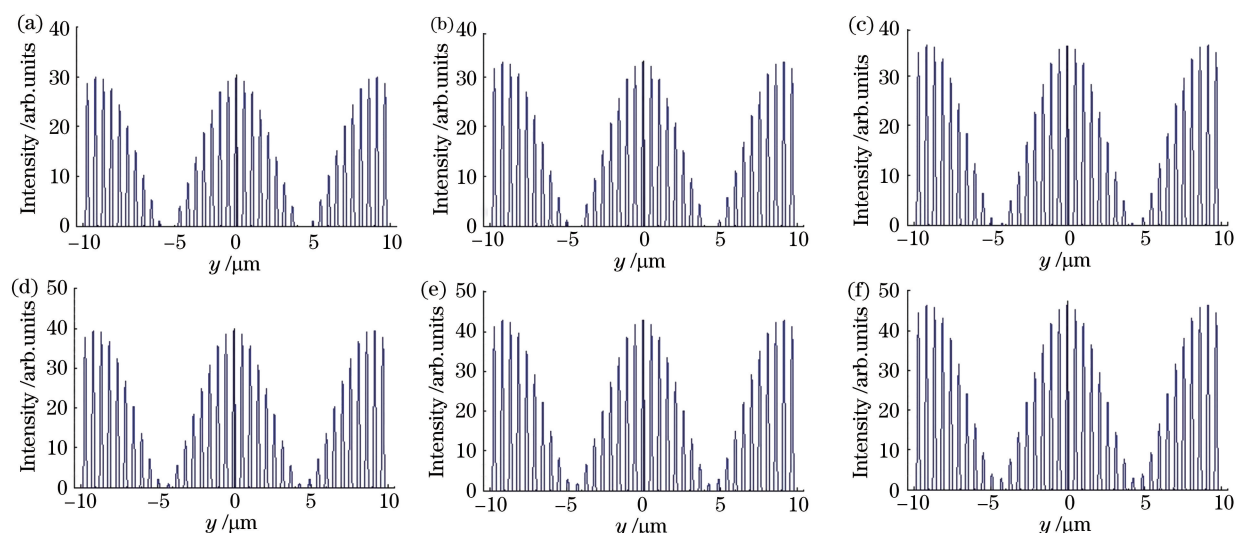


图 7 主副光束振幅比不同的光强分布。(a) $A_p/A_m=1$; (b) $A_p/A_m=1.1$; (c) $A_p/A_m=1.2$; (d) $A_p/A_m=1.3$;
(e) $A_p/A_m=1.4$; (f) $A_p/A_m=1.5$

Fig. 7 Intensity distributions at different amplitude ratios of main and auxiliary beams. (a) $A_p/A_m=1$; (b) $A_p/A_m=1.1$;
(c) $A_p/A_m=1.2$; (d) $A_p/A_m=1.3$; (e) $A_p/A_m=1.4$; (f) $A_p/A_m=1.5$

实现折射率渐变精度、阵列周期、折射率对比度不同的微透镜及阵列的制作。本研究可为 GPC 透镜、阵列设计和大面积全息制作提供参考。

参 考 文 献

- [1] Vasić B, Isić G, Gajić R, et al. Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime[J]. Optics Express, 2010, 18(19): 20321-20333.
- [2] Rinnerbauer V, Shen Y C, Joannopoulos J D, et al. Superlattice photonic crystal as broadband solar absorber for high temperature operation[J]. Optics Express, 2014, 22(S7): A1895-A1906.
- [3] Rinnerbauer V, Lausecker E, Schäffler F, et al. Nanoimprinted superlattice metallic photonic crystal as ultraselective solar absorber[J]. Optica, 2015, 2(8): 743-746.
- [4] Hassan S, Lowell D, Lin Y K. High light extraction efficiency into glass substrate in organic light-emitting diodes by patterning the cathode in graded superlattice with dual periodicity and dual basis[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(23): 233104.
- [5] Wang G P, Tan C L, Yi Y X, et al. Holography for one-step fabrication of three-dimensional metallodielectric photonic crystals with a single continuous wavelength laser beam [J]. Journal of Modern Optics, 2003, 50(14): 2155-2161.
- [6] Wang X, Ng C Y, Tam W Y, et al. Large-area two-dimensional mesoscale quasi-crystals [J]. Advanced Materials, 2003, 15(18): 1526-1528.
- [7] Ohlinger K, Lutkenhaus J, Arigong B, et al. Spatially addressable design of gradient index structures through spatial light modulator based holographic lithography [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(21): 213102.
- [8] Behera S, Joseph J. Single-step optical realization of bio-inspired dual-periodic motheye and gradient-index-array photonic structures[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3579-3582.
- [9] Hu Y W, Wang Z B, Weng Z K, et al. Bio-inspired hierarchical patterning of silicon by laser interference lithography [J]. Applied Optics, 2016, 55(12): 3226-3232.
- [10] Lowell D, Lutkenhaus J, George D, et al. Simultaneous direct holographic fabrication of photonic cavity and graded photonic lattice with dual periodicity, dual basis, and dual symmetry [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14444-14452.
- [11] Sun X H, Tao X M, Wang Y Y. Various photonic crystal structures fabricated by using a top-cut hexagonal prism [J]. Applied Physics A, 2010, 98(2): 255-261.
- [12] Sun X H, Liu W, Wang G L, et al. Optics design of a top-cut prism interferometer for holographic photonic quasicrystals [J]. Optics Communications, 2012, 285(21/22): 4593-4598.
- [13] Sun X H, Wu Y L, Liu W, et al. Luneburg lens composed of sunflower-type graded photonic crystals [J]. Optics Communications, 2014, 315: 367-373.