

doi:10.3788/gzxb20174610.1023005

# 基于亚波长高对比度光栅的波前调控器设计

武华<sup>1</sup>, 彭莉<sup>1</sup>, 袁寿财<sup>1</sup>, 张文博<sup>1</sup>, 刘巧莉<sup>2</sup>, 董建<sup>2</sup>

(1 赣南师范大学 物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000)

(2 北京工业大学 电子科学与技术学院 光子器件研究实验室, 北京 100124)

**摘 要:** 基于严格耦合波分析法分析了亚波长光栅波前调控的方法, 设计了具有凸透镜、锥透镜和闪耀光栅功能的三种亚波长光栅结构, 以平面方式制备了具有聚焦和闪耀效果的三种微纳结构波前调控器. 计算了不同光栅厚度、光栅齿和光栅槽宽度下的光栅透射率, 通过选择合适光栅参数组合, 得到三种波前调控器透射率均在 97% 以上. 硅基平面结构与常规结构器件性能相比, 平面和常规透镜、锥透镜在聚焦效果上, 焦斑的半高全宽近似相等, 峰值强度提高了 1.64 和 2.35 倍; 平面相对常规闪耀光栅的峰值强度提高了 3.77 倍.

**关键词:** 亚波长高对比度光栅; 波前调控器; 透镜; 微光学; 严格耦合波分析

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)10-1023005-6

## Design of Wavefront Controller Based on Subwavelength High-contrast Grating

WU Hua<sup>1</sup>, PENG Li<sup>1</sup>, YUAN Shou-cai<sup>1</sup>, ZHANG Wen-bo<sup>1</sup>, LIU Qiao-li<sup>2</sup>, DONG Jian<sup>2</sup>

(1 College of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

(2 Photonic Device Research Laboratory, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the rigorous coupled wave analysis method, the subwavelength grating wavefront control method was analyzed, three subwavelength grating structures with the function of convex lens, cone lens and blazed grating were designed. These devices achieve good focus and blazing effect. By calculating the grating transmittance at different grating thickness, grating teeth and grating groove width, the transmittances of the three wavefront manipulation devices are all above 97% after selecting the combination of suitable grating parameters. Compared the performance of silicon-based planar structural devices with conventional structural devices, the lens and the cone lens of the planar structure, the Full Width at High Maximum of the focal spot is approximately equal to that of the conventional lens and cone lens, but the peak intensity is increased to 1.64 and 2.35 times. The peak intensity of the planar relative to the conventional blazed grating is increased to 3.77 times.

**Key words:** Subwavelength high-contrast grating; Wavefront manipulation; Lens; Micro-optics; Rigorous coupled wave analysis

**OCIS Codes:** 230.1950; 230.1150; 050.2770; 050.2065; 050.6624

## 0 引言

透镜、锥透镜和闪耀光栅是三种常用来进行波前调控的光学元件, 应用领域包括成像、通信、显示、传感和仪器等, 通常用传统工艺如机械的铣、磨、抛光等方法来制造, 不仅制造工艺复杂, 而且元件尺寸大、重量

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 61650404)、江西省教育厅科技项目(GJJ150998)和赣南师范大学校级科研课题(Nos.13kyz12, 16zb04)资助

**第一作者:** 武华(1979—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为半导体光电子器件及器件物理. Email: wh1125@126.com

**收稿日期:** 2017-04-03; **录用日期:** 2017-06-21

<http://www.photon.ac.cn>

大、成本高<sup>[1-3]</sup>.在各种应用领域中,要求元件的单片集成、尺寸、重量和成本降低,但是集成光学元件要求元件设计兼容于微制造工艺并且能提供比分立光学元件更好的性能.微纳光学将纳米技术与光学相结合,能够完成传统光学难以完成的微小、阵列及任意波前变换,对以光学元件为基础的信息捕获、抽取、测量和控制等都产生了极大影响.但微纳光学领域利用微制造工艺制备凸面的透镜、锥面的锥透镜和锯齿的闪耀光栅都有一定难度.亚波长高对比度光栅(High-contrast Grating, HCG)是高折射率光栅齿被低折射率介质包围的一种光栅, HCG 能用标准的平面光刻工艺来制备. HCG 通过用低折射率材料完全包围高折射率光栅介质,可以获得宽带高反射或高透射(反射率或透射率 $>99\%$ )<sup>[4-5]</sup>,产生高品质因子的谐振( $Q>10^7$ )<sup>[6-7]</sup>,这两种特性与其他刻蚀在高折射率衬底上但出射平面没有附加折射率对比的亚波长光栅大不相同.目前,周期性亚波长 HCG 已经在反射镜、高品质因数光学谐振腔、中空波导等很多领域展示了很好的应用前景<sup>[8-9]</sup>.通过两个平行的 HCG 能实现空心波导,光在两个平行的 HCG 之间传输,通过设计 HCG 反射系数的相位,在空心波导中实现慢光<sup>[10]</sup>.两个相邻的空心波导能被一个单层 HCG 完全隔离,从而实现超紧凑光分束器和耦合器<sup>[11]</sup>.近年来,非周期性亚波长 HCG 被用来实现带聚焦功能的反射、透射和偏振分束, Fattal 等<sup>[12]</sup>利用非周期性亚波长 HCG 设计并制备出平面带有聚焦功能的反射镜,反射率在 $80\% \sim 90\%$ 范围; Lu 等<sup>[13]</sup>利用光的相位受 HCG 占空比影响的性质,通过非周期性亚波长 HCG 设计了平面高数值孔径低损耗带有聚焦功能的反射镜和透镜,理论计算反射镜和透镜的数值孔径分别为 0.81 和 0.96,损耗为 0.3 dB 和 0.2 dB; Lee 等<sup>[14]</sup>利用不同厚度光栅齿的非周期性亚波长 HCG 设计了带有聚焦功能的偏振分束器,理论计算同一器件结构对 TM 偏振光实现反射聚焦,对 TE 偏振光实现透射聚焦,功率效率都超过 $80\%$ ,偏振抑制比约为 10 dB.

本文利用平面结构的非周期性亚波长 HCG 相位调控功能设计了三种波前调控器,制备了应用于微光学领域的具有凸面透镜、锥面锥透镜和锯齿闪耀光栅结构的功能器件,且器件仅有约 $1 \mu\text{m}$ 数量级的厚度.本文仅限于横磁(Transverse Magnetic, TM)偏振(电场偏振方向垂直于光栅齿方向)的 $1550 \text{ nm}$ 波长的入射光,但设计规则同样适用于横电(Transverse Electric, TE)偏振(电场偏振方向平行于光栅齿方向)情况.

## 1 非周期性亚波长高对比度光栅的相位调控方法

非周期性亚波长 HCG 结构见图 1,粗箭头表示光传播方向,细箭头表示电场偏振方向.高折射率硅( $n_1=3.476$ )光栅由低折射率空气( $n_0=1.0$ )包围,对非周期性 HCG,标记为 $0, 1, 2, \dots$ 的不同光栅齿具有不同的光栅齿宽度和空气间隙,但厚度保持为常数.基于 HCG 设计的三种波前调控器均工作在透射模式下,故要求 HCG 的透射率越高越好. HCG 高透射率的机制可解释为:物理上, HCG 可以看成是传播方向沿 $y$ 轴的短的平板波导阵列,入射光激发波导阵列的多个模式,前两个模式起主要作用,更高阶的模式都低于截止条件具有倏逝的表面束缚波的形式<sup>[15]</sup>.两个模式在光栅内沿 $z$ 方向传播,传播常数由光栅齿宽度、空气隙和折射率决定,当 HCG 的厚度合理设计时,两个模式之间能在 HCG 输出平面实现干涉相长从而实现高透射.

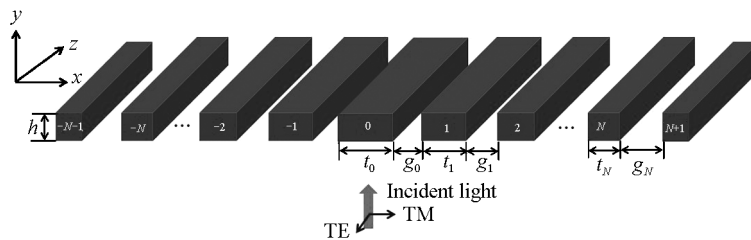


图 1 非周期性 HCG 结构

Fig.1 Schematic of a non-periodic HCG

根据布喇格相位匹配条件,亚波长 HCG 仅存在 0 级次衍射. HCG 有三个物理参数可以控制光栅的透射率(或反射率)及其相位:光栅齿的宽度 $t$ ,光栅槽(空气隙)的宽度 $g$ ,光栅的厚度 $h$ .入射光能激发限制在波导中的模式.由于 HCG 是高对比度光栅,导波被快速散射而不会在横向上传播很远,在这种情况下光栅可以看成是一个耦合的谐振腔系统,每一个高折射率的光栅齿可以看成是一个谐振腔,因为 HCG 工作在局域谐振情况下,所以 HCG 在空间中特定点的反射或透射属性仅依赖于该点附近的局域几何结构<sup>[12]</sup>.当一个平面波入射到一个非周期性 HCG 上时,反射和透射光的相位将沿 $x$ 轴变化.即可以在横向上改变光栅结构参数来实现反射或透射光任意的相位分布,非周期性 HCG 中的每一个具有特定宽度的光栅齿和空气隙能提供

期望的相位,这样非周期性光栅是可形成离散的相位分布.由于离散相位分布在空间上的间隔是亚波长的,所以这样的离散相位分布是连续相位分布的很好近似.除了相位分布之外,HCG的反射率或透射率必须足够高才能形成一个低损耗的工作在反射或透射状态的光学器件.

利用严格耦合波分析方法(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)计算了不同光栅厚度、光栅齿和光栅槽宽度下的光栅透射率及其相位.优化设计过程中光栅厚度从0开始每次增加10 nm,计算不同厚度下对应的不同光栅齿和光栅槽宽度下的光栅透射率及其相位,图2显示了在光栅厚度4.9  $\mu\text{m}$ 下不同光栅齿和光栅槽宽度下的光栅透射率及其相位,在该光栅厚度下可以获得高的透射率和大的相位变化,在图中所有参数取值下,透射率都高于96.8%,而透射光相位在 $0\sim 2\pi$ 之间变化,入射光为TM偏振.因此,通过非周期性亚波长HCG改变光栅参数能实现透射光的任意相位分布,同时能保证高的透射率.为了方便设计,光栅参数取值在图2(b)中的虚线上选取,该虚线上HCG周期为常数0.505  $\mu\text{m}$ ,占空比(定义为光栅齿宽度与光栅周期的比值)在0.17~0.36之间.在完成具有特定透射相位分布的非周期性HCG的设计之后,用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法数值仿真来评价所实现的波前调控器的性能.

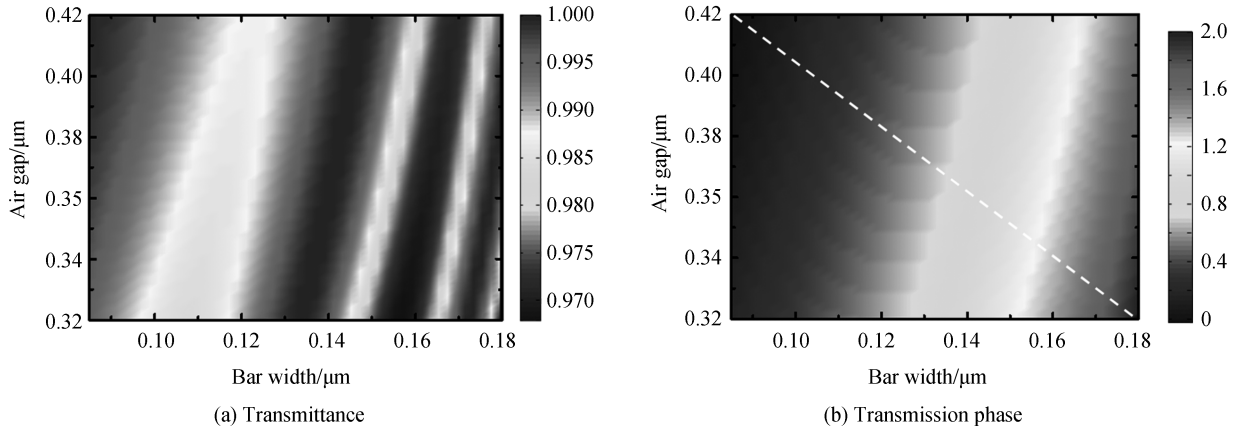


图2 光栅齿和光栅槽在不同宽度取值下亚波长HCG的透射率及其透射相位分布

Fig.2 Transmittance and transmission phase for subwavelength HCG with different widths of grating tooth and grating groove

## 2 基于非周期性亚波长高对比度光栅的波前调控器

图3显示的是三种波前调控器,即常规的透镜、锥透镜和闪耀光栅.透镜、锥透镜和闪耀光栅的在空间上的相位差分布分别为

$$\Delta\varphi(x) = \varphi(x) - \varphi(0) = \begin{cases} \frac{2\pi n_0}{\lambda} (f - \sqrt{f^2 + x^2}) & \text{for lens} \\ \begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_0) \frac{2d_0}{D} \left(\frac{D}{2} + x\right) & \left(-\frac{D}{2} \leq x \leq 0\right) \\ \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_0) \frac{2d_0}{D} \left(\frac{D}{2} - x\right) & \left(0 \leq x \leq \frac{D}{2}\right) \end{cases} & \text{for axicon} \\ \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_0) \text{mod}(x, L) \tan \theta_b & \text{for blazed grating} \end{cases}$$

式中, $\varphi(x)$ 为任意 $x$ 位置的透射光相位分布, $f$ 为透镜焦距, $D$ 和 $d_0$ 为锥透镜的口径和厚度, $L$ 和 $\theta_b$ 为闪耀光栅的周期和闪耀角.参数取值为: $f=15 \mu\text{m}$ , $D=30 \mu\text{m}$ , $d_0=0.625 \mu\text{m}$ , $L=7.07 \mu\text{m}$ , $\theta_b=5^\circ$ 时,透镜、锥透镜和闪耀光栅的相位差分布见图3(d)~(f).其中透镜的相位差分布取了模 $2\pi$ ,将相位超过 $2\pi$ 的数值变换到 $0\sim 2\pi$ 之间的等效数值,图3(d)中每一个锯齿相应于一个 $2\pi$ 窗口.设计的平面透镜、锥透镜和闪耀光栅结构见图3(d)~(f),平面结构形成的离散相位分布都落在图3(d)~(f)中的相位分布曲线上.从图2(b)中虚线上的光栅参数取值可以看出,光栅齿越宽,光栅槽越窄,透射相位差越大.设计的平面透镜结构在 $x$ 方向上从中间向两边由于存在多个 $2\pi$ 窗口,故器件结构特征是从中间向两边多次出现光栅齿由宽变窄,相应地光栅槽由窄变宽;设计的平面锥透镜结构在 $x$ 方向上从中间向两边由于只存在一个 $2\pi$ 窗口,故器件结构特征

是从中间向两边光栅齿由宽变窄,相应地光栅槽由窄变宽;设计的平面闪耀光栅结构在  $x$  方向上从右向左重复出现多个  $2\pi$  窗口,故器件结构特征是从右向左多次重复出现光栅齿由宽变窄,相应地光栅槽由窄变宽.

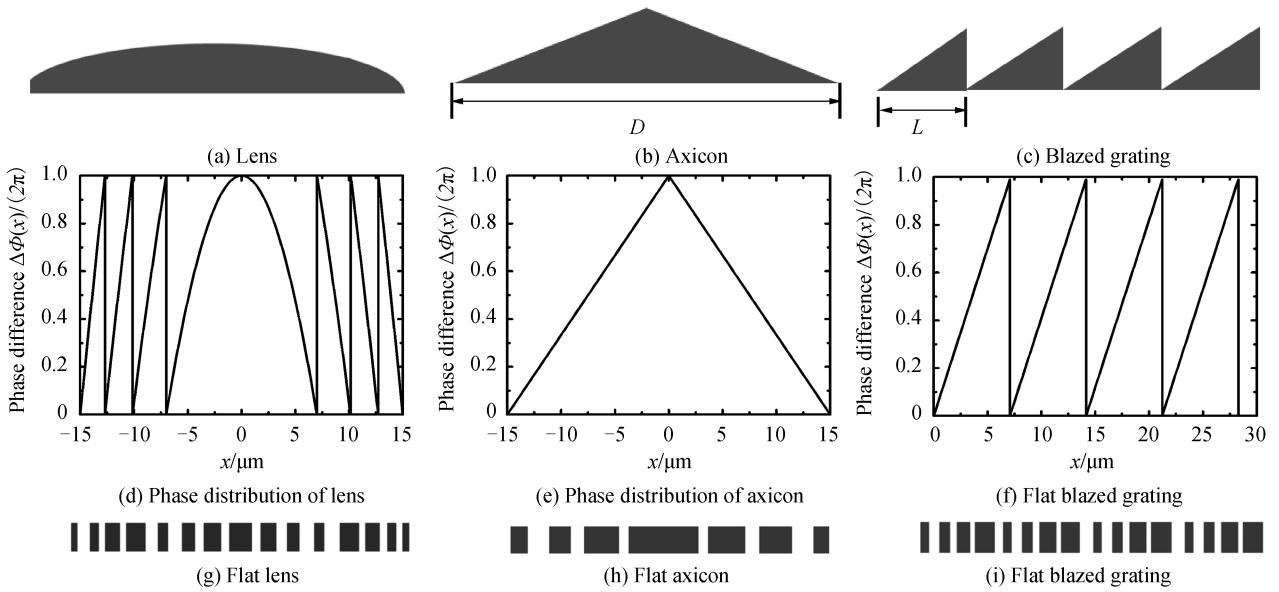
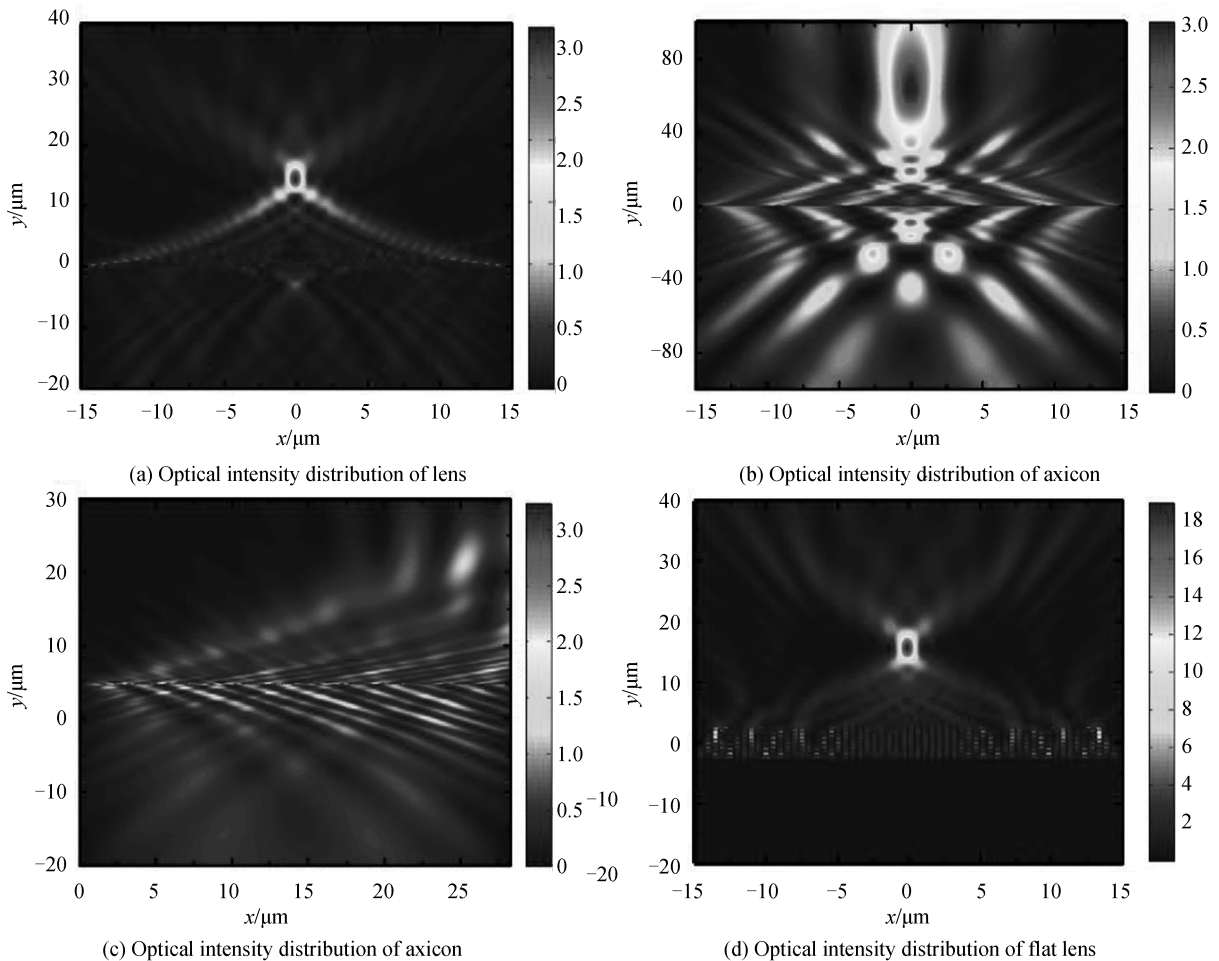


图3 常规透镜、锥透镜和闪耀光栅及平面透镜、锥透镜和闪耀光栅结构及其对应的相位分布  
 Fig.3 Schematic and phase distribution for lens, axicon, blazed grating, flat lens, flat axicon and flat blazed grating  
 模拟计算过程中,入射光均为 H 场归一化振幅为 1 的均匀平面波,从 HCG 的底部垂直入射.图 4(a)~





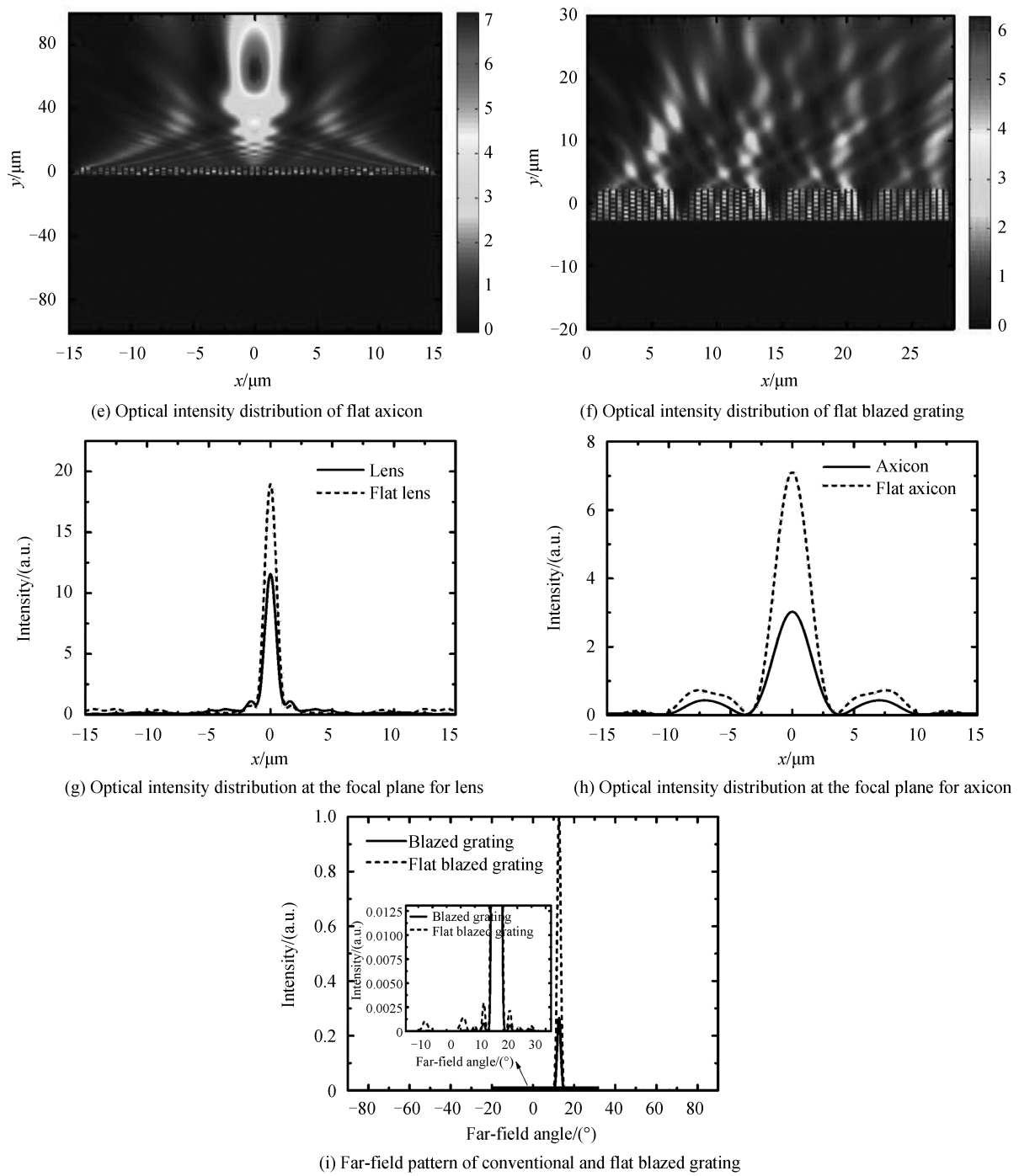


图4 各种波前调控器的光强分布和远场图

Fig.4 Optical intensity distribution and far-field pattern of various wavefront controllers

(c)为常规透镜、锥透镜和闪耀光栅的光强分布,(d)~(f)为本文设计的平面透镜、锥透镜和闪耀光栅的光强分布,(g)、(h)分别为常规的透镜、锥透镜在焦平面处的光强分布,(i)为常规和平面闪耀光栅的远场图.对比图4(a)~(c)与(d)~(f),可以看出常规透镜、锥透镜和闪耀光栅都存在较大的反射,透射率仅为56.3%、50.7%和47.7%,这是由于Si和空气存在大的折射率差引起;平面的透镜、锥透镜和闪耀光栅由于其组成单元HCG的透射率很高,使得整体的透射率很高,分别为97%、97.9%和97.5%.对比图4(g)与(h),可以看出常规透镜和锥透镜在焦平面处光斑的半高全宽(Full-Width-Half-Maximum, FWHM)分别为 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $3.42\ \mu\text{m}$ ,峰值强度分别为11.57和3.03;平面的透镜和锥透镜在焦平面处光斑的FWHM分别为 $1.12\ \mu\text{m}$ 和 $3.15\ \mu\text{m}$ ,峰值强度分别为18.97和7.11.可见平面与常规透镜和锥透镜聚焦效果相比,焦斑的FWHM近似相等,但峰值强度提高到了1.64和2.35倍.从图4(i)可以看出,常规闪耀光栅和平面闪耀光栅均将几乎全部

的透射光能量集中到了设计的 1 级次衍射光中,在 12.66° 角度方向上,但平面相对常规的闪耀光栅的峰值强度提高到了 3.77 倍。

### 3 结论

基于 RCWA 方法得出了不同结构参数 HCG 的透射率及其相位特性,通过设计非周期性 HCG 的透射率和相位,以平面方式设计了三种波前调控器,实现了微光学领域难于制备的凸面的透镜、锥面的锥透镜和锯齿的闪耀光栅的功能.采用 FDTD 方法,模拟计算了这三种波前调控器的特性.平面硅基透镜、锥透镜和闪耀光栅受益于 HCG 的高透射率,透射率分别为 97%、97.9% 和 97.5%,远高于硅基常规透镜、锥透镜和闪耀光栅的透射率 56.3%、50.7% 和 47.7%.平面和常规透镜与锥透镜聚焦效果相比,焦斑的 FWHM 近似相等,峰值强度提高到了 1.64 和 2.35 倍.常规闪耀光栅和平面闪耀光栅均将几乎全部的透射光能量集中到了设计的 1 级次衍射光中,平面相对常规的闪耀光栅的峰值强度提高到了 3.77 倍.平面结构波前调控器可以应用到各种硅基集成的光学平台中去,基于平面结构波前调控器的优势可以提升系统的整体性能。

#### 参考文献

- [1] 杨国光. 微光学与系统[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2008.
- [2] HU Jin, DONG Xiao-xuan, PU Dong-lin, *et al.* High resolution pattern-integrated interference lithography based on blazed grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(12): 3335-3342.  
胡进, 董晓轩, 浦东林, 等. 基于闪耀光栅图形化实现高分辨率干涉光刻[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(12): 3335-3342.
- [3] WANG Xiao-duo, LIU Hua, LI Yun-peng, *et al.* Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0822002.  
王晓朵, 刘华, 李云鹏, 等. 光谱仪光源双光束准直的自由曲面透镜[J]. 光子学报, 2016, **45**(8): 0822002.
- [4] MATUES C F R, HUANG M C Y, CHEN L, *et al.* Broad-band mirror (1.12-1.62  $\mu\text{m}$ ) using a subwavelength grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(7): 1676-1678.
- [5] HE S, WANG Z, LIU Q, *et al.* Study of focal shift effect in planar GaN high contrast grating lenses[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(23): 29360-29369.
- [6] ZHOU Y, MOEWE M, KERN J, *et al.* Surface-normal emission of a high-Q resonator using a subwavelength high-contrast grating[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(22): 17282-17287.
- [7] ZHU L, YANG W, CHANG-HASNAIN C J. Quality factor for high contrast grating resonators[C]. IEEE Photonics Conference, 2012: 338-339.
- [8] CHANG-HASNAIN C J, YANG W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics[J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2012, **4**(3): 379-440.
- [9] PESALA B, YANG W, CHANG-HASNAIN C J. Compact on-chip optical components based on multimode interference design using high-contrast grating hollow-core waveguides [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(6): 279-287.
- [10] SUN T, YANG W, KARAGODSKY V, *et al.* Low-loss slow light inside high contrast grating waveguide[C]. The International Society for Optical Engineering, 2012, 8270: 6.
- [11] PESALA B, KARAGODSKY V, CHANG-HASNAIN C. Ultra-compact optical coupler and splitter using high-contrast grating hollow-core waveguide[C]. *Integrated Photonics Research*, 2010.
- [12] FATTAL D, LI J J, PENG Z, *et al.* Flat dielectric grating reflectors with focusing abilities[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(7): 466-470.
- [13] LU F, SEDGWICK F G, KARAGODSKY V, *et al.* Planar high-numerical-aperture low-loss focusing reflectors and lenses using subwavelength high contrast gratings[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12606-12614.
- [14] LEE J H, YOON J W, JUNG M J, *et al.* A Semiconductor metasurface with multiple functionalities: a polarizing beam splitter with simultaneous focusing ability[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(23): 233505.
- [15] WU Hua, LI Chong, GUO Xia. Structural design and physical analysis of nano-gratings with high reflectance, high transmittance and high-Q resonance [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(12): 1884-1890.  
武华, 李冲, 郭霞. 高反射、高透射和高 Q 谐振的纳米光栅结构设计及物理分析[J]. 北京工业大学学报, 2015, **41**(12): 1884-1890.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61650404), the Science and Technology Research Project of Jiangxi Provincial Education Department (No. GJJ150998), and the Science and Technology Research Project of Gannan Normal University (Nos. 13kyz12, 16zb04)