

激光与光电子学进展

基于双锥干涉法的双周期渐变光子晶体透镜
聚焦特性研究

张晓荣, 杨贺, 孙晓红*

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 构建双锥干涉模型设计双周期渐变光子晶体(GPC)结构,基于该结构的渐变光强分布设计了介质柱尺寸渐变的 GPC 透镜,并研究了内外锥干涉角对 GPC 周期及透镜聚焦特性的影响。研究发现,干涉光束内外锥角正弦差决定透镜大周期,而外锥角则直接影响小周期。当透镜大周期固定时,小周期越小,聚焦效果越好;而小周期固定时,大周期越小,透镜数值孔径越大。所设计的透镜可实现亚衍射极限聚焦,该研究有助于透镜在光耦合、光集成、光显示以及成像方面的应用。

关键词 双周期渐变光子晶体; 双锥干涉; 自聚焦透镜; 透镜阵列

中图分类号 O799

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1709001

Study on Focusing Characteristics of Double-Period Graded Photonic
Crystal Lens Based on Biconical Interferometry

Zhang Xiaorong, Yang He, Sun Xiaohong*

Key Laboratory of Laser and Optoelectronic Information Technology of Henan Province, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract As a biconical interference model is constructed to design a double-period graded photonic crystal (GPC) structure, we design a GPC lens with graded dielectric column size based on the graded light intensity distribution of the GPC structure, and study the influence of the inner and outer cone interference angle on the GPC period and the focusing characteristics of the lens. It is found that the sine difference of the inner and outer cone angles of the interference beam determines the large period of the lens, while the outer cone angle directly affects the small period. When the large period of the lens is fixed, the smaller the small period is, the better the focusing effect will be. What's more, when the small period is fixed, the smaller the large period is, the larger the numerical aperture of the lens will be. The designed lens can achieve sub-diffraction-limit focusing. This research is helpful for the application of lenses in optical coupling, optical integration, optical display, and imaging.

Key words double-period graded photonic crystal; biconical interference; self-focusing lenses; lens arrays

1 引言

渐变光子晶体(GPC)是介质材料折射率或材料的填充比等结构参量发生梯度变化的光子晶体(PC)结构。近年来,对 GPC 的研究越来越多^[1-4],其潜在的应用范围有自聚焦透镜、隐身、光学黑洞^[5]、平面白光有机发光二极管(OLED)^[6]等多个方面。随着 PC 的研究越来越深入,其结构趋向复杂化,制备难度也越来越大。当前,常用的光子晶体制备方法有纳米压印光刻、胶体自组装、电子束刻蚀和激光全息光刻^[7-9]等。其中,激光全

息光刻是大面积制造 PC 更加简单、有效的方法。

激光全息光刻是将多光束干涉形成的结构刻蚀在感光材料上的一种 PC 制造技术,通过控制光束的光学参数(数量、位置、光强)可以得到不同类型的结构^[10-11]。将 GPC 作为自聚焦透镜来研究,用来实现光束的聚焦^[12-16]、准直、耦合、成像^[17]等功能。GPC 透镜相比于传统透镜,具有超小质量、超小尺寸、高数值孔径、大焦深、极小像差、易于集成等优点,其对将来光通信集成光路的简化和性能提升有重要意义,在多个光通信领域有着广阔的应用前景^[18-20]。

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2021-11-29; 录用日期: 2021-12-21

基金项目: 河南省重大科技专项(161100210200)、河南省激光与光电信息技术重点实验室基金(22110002)

通信作者: *iexhsun@zzu.edu.cn

本文利用 4+4 光束双锥干涉法设计 GPC 结构, 基于 GPC 渐变光强分布设计介质柱尺寸渐变的 GPC 透镜结构, 研究干涉模型参数对透镜聚焦性能的影响。

2 GPC 透镜设计

2.1 双锥干涉模型

激光全息光刻是利用多光束干涉形成微结构, 将其刻在光敏材料上, 是获得具有特定排布规律的微型结构器件的一种方法。本文选用的是 4+4 光束双锥干涉模型, 如图 1 所示。

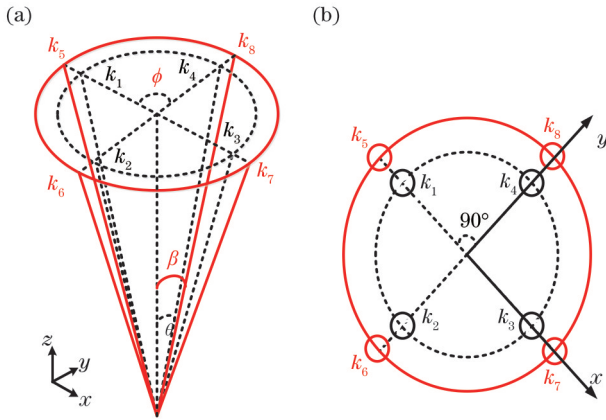


图 1 双锥干涉模型。(a)主视图;(b)俯视图

Fig. 1 Double-cone interference model. (a) Main view; (b) top view

图 1(a)是双锥干涉模型的主视图。其中: k_1, k_2, k_3, k_4 为内锥(虚线)4束光的波矢大小; k_5, k_6, k_7, k_8 为外锥(实线)4束光的波矢大小。 θ 为内锥角,即内锥光束与 z 坐标轴的夹角; β 为外锥角,即外锥光束与 z 坐标轴的夹角。图 1(b)是双锥干涉模型在 x - y 平面的俯视图,内外锥相邻的两个光之间的方位角 ϕ 为 90° 。

2.1.1 光强分布计算

在图 1 的双锥干涉模型中,8束传播方向不同的光(k_1, k_2, \dots, k_8)交叠干涉产生二维渐变的干涉结构。8束干涉光的波矢大小为

$$k_m = k \left(\cos \frac{2(m-1)\pi}{4} \sin \theta, \sin \frac{2(m-1)\pi}{4} \sin \theta, \cos \theta \right), \quad (1)$$

$$k_n = k \left(\cos \frac{2(n-1)\pi}{4} \sin \beta, \sin \frac{2(n-1)\pi}{4} \sin \beta, \cos \beta \right), \quad (2)$$

式中: k_m 为第 m 束内锥光束的波矢大小; k_n 为第 n 束外锥光束的波矢大小, $m=1, 2, 3, 4, n=5, 6, 7, 8$ 。

假定双锥干涉的8束光全部为线偏振光,将线偏振光偏振矢量(电场矢量)沿坐标轴 x, y, z 方向分解,则

$$\mathbf{E}_m = (A_{mx} \mathbf{e}_x + A_{my} \mathbf{e}_y + A_{mz} \mathbf{e}_z) \exp(ik_m \cdot \mathbf{r} - \omega t - \delta_m), \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_n = (A_{nx} \mathbf{e}_x + A_{ny} \mathbf{e}_y + A_{nz} \mathbf{e}_z) \exp(ik_n \cdot \mathbf{r} - \omega t - \delta_n), \quad (4)$$

式中: $\mathbf{E}_m, \mathbf{E}_n$ 为内外锥光束的电场强度; $A_{mx}, A_{my}, A_{mz}, A_{nx}, A_{ny}, A_{nz}$ 为内外锥光束的振幅在 x, y, z 方向的分量; r 为其位置矢量大小; ω 为其角频率; t 为时间; δ_m, δ_n 为内外锥光束的初相位。8束光的干涉光强为

$$I = \sum_n \sum_m (\mathbf{E}_m + \mathbf{E}_n) \times (\mathbf{E}_m + \mathbf{E}_n)^*, \quad (5)$$

式中: I 为全部光束光强的总和; $(\mathbf{E}_m + \mathbf{E}_n)^*$ 为内外锥光束电场强度的共轭。

在线偏振光入射的条件下,对比模拟偏振对 GPC 结构的影响:在理想状态下,各束光的偏振方向都与 x 轴的夹角相同且同为 0° ;通过在各束光加偏振片,使得各束光偏振方向不同且与 x 轴的夹角为 $5^\circ, 20^\circ, 15^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 。分别将波长 $\lambda=355 \text{ nm}$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\beta=50^\circ$ 以及不同的偏振方向代入式(1)~式(5),可得到图 2(a)、2(b)所示的干涉结构。在干涉图案中可以看出双周期的渐变光强分布结构:大小周期均为正方晶格结构,用 T_s 表示光子结构阵列的大周期,用 T_p 表示光子结构阵列的小周期,即晶格周期。取图 2(a)、2(b)所示的干涉结构 $y=0$ 处的光强分布,如图 2(c)、2(d)所示。由于各个光束的偏振方向发生改变,其中心光强变小,晶格结构仍是正方晶格,大小周期也没有改变。

2.1.2 大小周期计算

由多光束干涉理论可知, x 方向的小周期 T_p 为

$$T_p = \frac{2\pi}{|\Delta k_{nx}|} = \frac{2\pi}{|k_{5x} - k_{6x}|} = \frac{\lambda}{\left| \cos \frac{(n_5-1)\pi}{4} - \cos \frac{(n_6-1)\pi}{4} \right| \sin \beta} = \frac{\sqrt{2} \lambda}{\sin \beta}, \quad (6)$$

式中: k_{5x} 和 k_{6x} 为外锥相邻两束光 x 方向的波矢分量; n_5 和 n_6 为外锥相邻两束光。

x 方向的大周期为

$$T_{sr} = \frac{2\pi}{|\Delta k_{mrx}|} = \frac{2\pi}{|k_{5x} - k_{1x}|} = \frac{\lambda}{\sin \beta - \sin \theta}. \quad (7)$$

由图 2 中正方形的几何关系可知图中大周期为

$$T_s = \frac{T_{sr}}{\sqrt{2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{2}(\sin \beta - \sin \theta)}. \quad (8)$$

大小周期的比值为

$$\frac{T_s}{T_p} = \frac{2 \sin \beta}{\sin \beta - \sin \theta}. \quad (9)$$

从式(6)和式(8)可知,小周期由外锥角 β 决定,与其正弦值成反比,而大周期与内外锥角的正弦差 $(\sin \beta - \sin \theta)$ 成反比,利用式(9)大小周期比值的关设计渐变结构相似的 GPC 结构,研究 GPC 透镜特性与双锥干涉模型的关系。

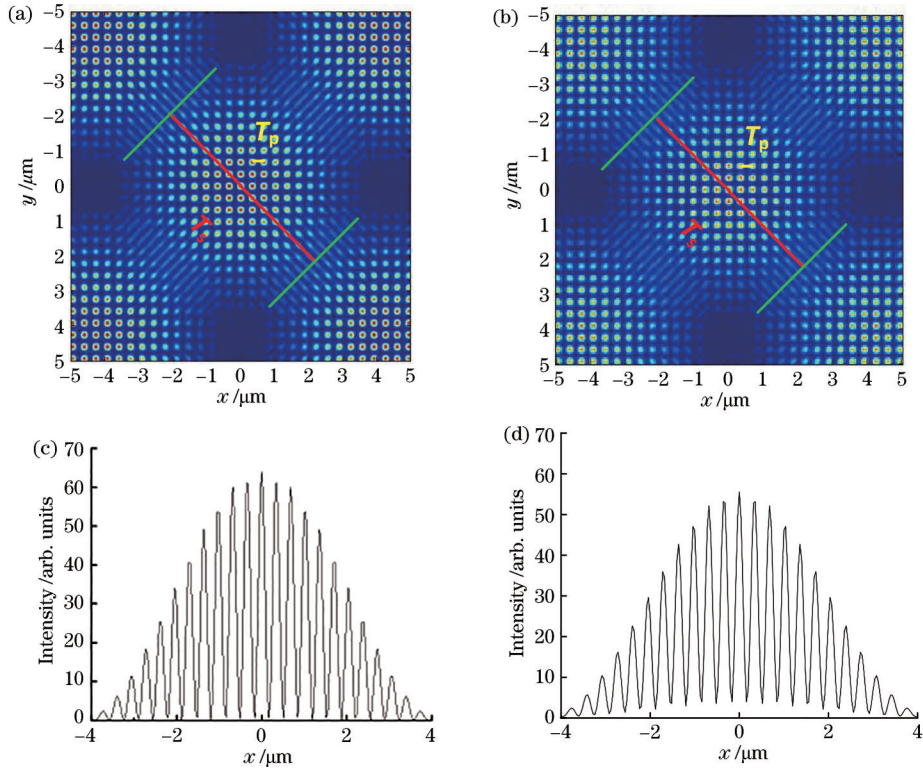


图 2 $\theta=45^\circ, \beta=50^\circ$ 时的干涉图案和光强分布。(a) 各束光的偏振方向与 x 轴的夹角相同时的干涉图案; (b) 各束光偏振方向与 x 轴的夹角不同时的干涉图案; (c) 各束光的偏振方向相同, $y=0$ 时的 GPC 强度分布; (d) 各束光的偏振方向不同, $y=0$ 时的 GPC 强度分布
Fig. 2 Interference patterns and GPC intensity distribution at $\theta=45^\circ$ and $\beta=50^\circ$. (a) Interference pattern when the angle between the polarization direction of each beam and the x -axis is the same; (b) interference pattern when the angle between the polarization direction of each beam and the x -axis is different; (c) GPC intensity distribution when the polarization direction of each beam is the same and $y=0$; (d) GPC intensity distribution when the polarization direction of each beam is different and $y=0$

2.2 构建 GPC 透镜

以 $\theta=45^\circ, \beta=50^\circ$ 、各束光的偏振方向相同且与 x 轴的夹角为 0° 、背景为空气、介质柱材料为 $n=1.52$ 的负性 SU-8 胶为例。通过仿真获得介质柱的位置, 根据光强分布确定介质柱的半径, 如图 3(a) 所示。

考虑到介质柱不能过小, 选择光强阈值 12.5 构建 GPC 透镜结构, 如图 3(b) 所示。因为 GPC 透镜是旋转对称结构, 所以选择了一系列介质柱来研究其纵向聚

焦特性, 考虑到实际制备过程中介质柱的长高比不宜太大, 介质柱的高度设为 $1.5 \mu\text{m}$, 焦距 l 为透镜出射端到焦平面的中点的距离, α 为最大孔径锥角的一半, r 为沿着 x 方向的渐变光子晶体透镜的半径, 将数值孔径定义为 $NA = \sin \alpha = \frac{r}{\sqrt{r^2 + l^2}}$ 。

为评估设计的 GPC 透镜性能, 计算了 TM 偏振光入射时透镜的透射谱, 如图 4 所示。从图中可知, 在可见光波段 TM 偏振的透过率大于 90%。

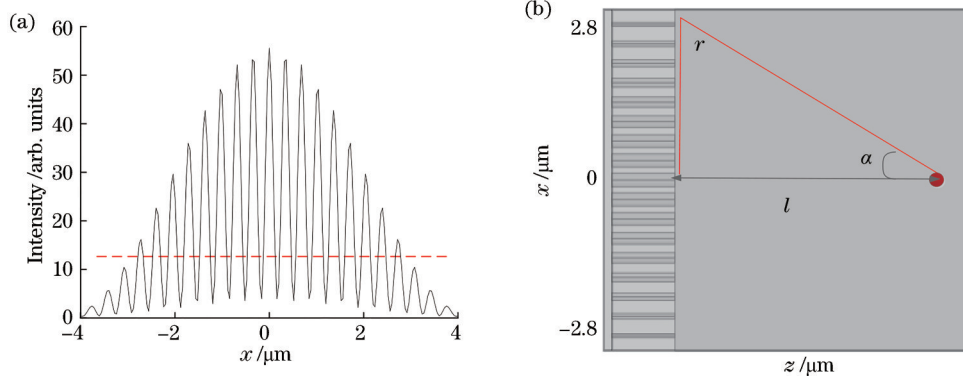


图 3 $\theta=45^\circ, \beta=50^\circ$ GPC 透镜设计。(a) $y=0$ 时 GPC 强度分布; (b) 光强阈值 12.5 对应的 GPC 透镜结构
Fig. 3 Design of GPC lens when $\theta=45^\circ$ and $\beta=50^\circ$. (a) GPC intensity distribution when $y=0$; (b) GPC lens structure when the light intensity threshold is 12.5

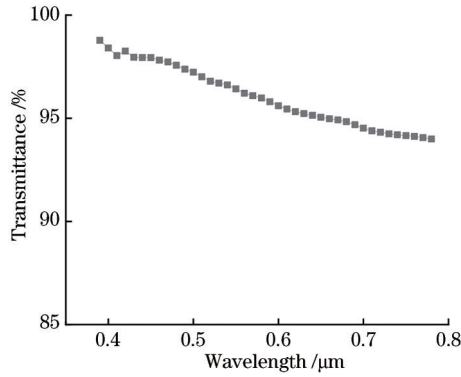


图 4 $\theta=45^\circ, \beta=50^\circ$ 时, GPC 透镜在 TM 偏振下的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of GPC lens under TM polarization when $\theta=45^\circ$ and $\beta=50^\circ$

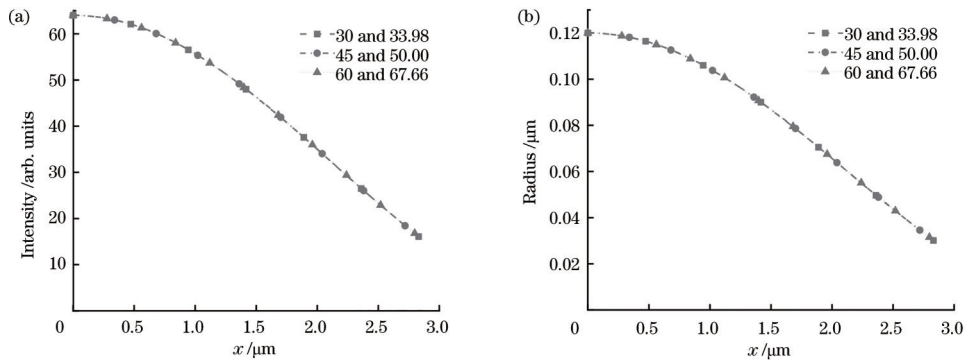


图 5 内外锥正弦差固定时, 三种情况沿 x 轴从透镜结构中心往边缘方向的 GPC 结构。(a) 强度分布; (b) 透镜介质柱半径分布

Fig. 5 GPC structures along the x -axis from the positive center of the lens structure toward the edge in the three cases when the sine difference of the inner and outer cone is fixed. (a) Intensity distribution; (b) radius distribution of lens media column

根据 Maxwell-Garnett 有效介质理论, 透镜的有效折射率可由介质柱与背景材料的折射率公式 $n_{TM} = \sqrt{(1-f)\epsilon_{\text{host}} + f\epsilon_{\text{rods}}}$ (其中, ϵ_{host} 和 ϵ_{rods} 分别为背景和介质柱的介电常数及介质柱填充因子 $f = \pi r^2 / T_p^2$) 计算出来。由图 5(b) 的介质柱半径分布得到透镜沿 x 轴的有效介质率变化如图 6 所示。从图中可知, 内外锥角正弦差固定

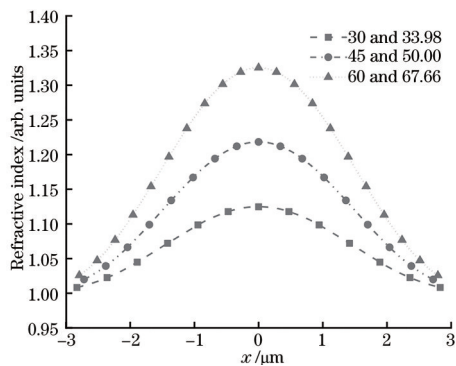


图 6 内外锥正弦差固定, 3 种情况下的 GPC 透镜沿 x 轴的有效折射率

Fig. 6 Effective refractive index of the GPC lens along the x -axis for the three cases when the sine difference of the inner and outer cone is fixed

3 模型参数对 GPC 透镜聚焦特性的影响

3.1 外锥角(小周期)的影响

研究内外锥正弦差固定情况下, 不同外锥角对 GPC 透镜聚焦特性的影响。将波长 $\lambda=355 \text{ nm}$, $\theta=45^\circ$, $\beta=50^\circ$ 代入式(1)~式(5)即可得到如图 3(b) 所示的 GPC 透镜。采用同样的方法可设计 $\theta=30^\circ, \beta=33.98^\circ$ 以及 $\theta=60^\circ, \beta=67.66^\circ$ 的 GPC 透镜。

图 5 给出了 3 种情况下 GPC 结构沿 x 轴从透镜结构中心往边缘方向的渐变光强分布以及相应透镜的介质柱半径分布。从图中发现 GPC 渐变光强变化梯度相同(曲线斜率基本相同), 随着外锥角变大, GPC 结构的晶格常数分别为 $0.473, 0.339, 0.279 \mu\text{m}$, 即介质柱变密集。

时, 外锥角越大, 透镜中心与边缘的折射率差越大。

选择 TM 模式、 $\lambda=0.632 \mu\text{m}$ 的红光入射, 研究内外锥正弦差固定时外锥角对 GPC 透镜的焦点尺寸、焦距、数值孔径的影响, 结果如图 7 和图 8 所示。从图 7

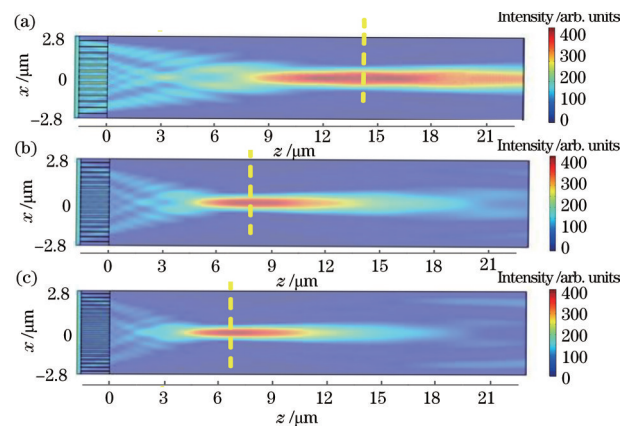


图 7 内外锥正弦差是定值, 三种透镜在 x - z 面的强度分布。(a) $\theta=30^\circ, \beta=33.98^\circ$; (b) $\theta=45^\circ, \beta=50^\circ$; (c) $\theta=60^\circ, \beta=67.66^\circ$

Fig. 7 Intensity distributions of the three lenses in the x - z plane when the sine difference of the inner and outer cone is fixed. (a) $\theta=30^\circ$ and $\beta=33.98^\circ$; (b) $\theta=45^\circ$ and $\beta=50^\circ$; (c) $\theta=60^\circ$ and $\beta=67.66^\circ$

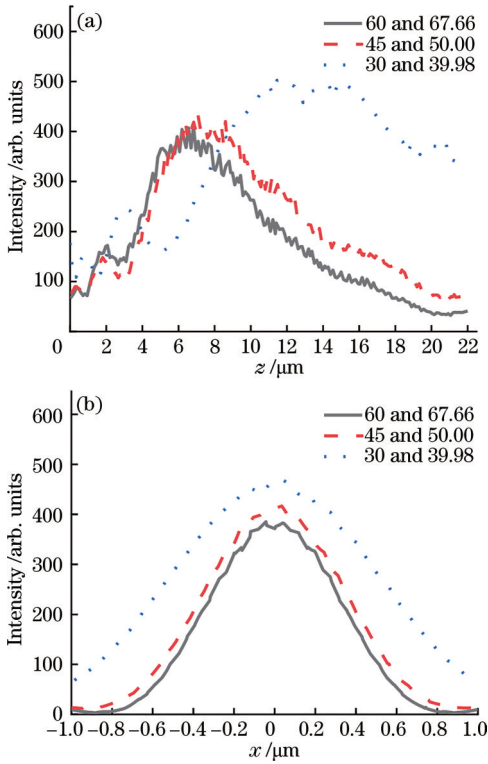


图 8 固定内外锥正弦差, 三种透镜的聚焦特性。(a)沿 z 轴 的强度分布; (b)沿 x 轴焦面上的强度分布

Fig. 8 Focusing characteristics of the three lenses when the sine difference of the inner and outer cone is fixed. (a) Intensity distribution along z -axis; (b) intensity distribution along x -axis focal plane

的光强分布可以看出, 干涉光束外锥角越大, 所得到透镜的焦距越短、聚焦效果越好。图 8 表示沿透镜 z 轴和 x 轴的光强分布。图 8(a) 给出随着外锥角的增大, 透镜焦距变化为 14.19、7.9、6.4 μm , 图 8(b) 给出相应焦点的尺寸分别为 1.19、0.78、0.75 μm 。按照图 3(b) 计算得到的数值孔径分别是 0.196、0.325、0.401。结果表明, 固定内外锥角正弦差, 外锥角越大, 焦点尺寸越小、数值孔径越大。

3.2 内外锥差(大周期)的影响

研究外锥角固定情况下, 不同内外锥差对 GPC 透镜的聚焦特性的影响。图 9 给出了 $\beta=67.66^\circ$, 内锥角 $\theta=60^\circ、58^\circ、56^\circ$ 3 种情况下沿 x 轴从透镜结构中心往边缘方向的渐变光强分布以及相应透镜的介质柱半径分布。从图中发现 GPC 渐变光强变化梯度随着内外锥差变大而变大, GPC 结构的晶格常数相同。根据 Maxwell-Garnett 有效介质理论, 由图 9(b) 的介质柱半径分布得到透镜沿 x 轴的有效介质率变化, 如图 10 所示。从图中可知外锥角固定时, 内外锥差越大, 透镜中心与边缘的折射率梯度越大。

选择 TM 模式、 $\lambda=0.632 \mu\text{m}$ 的红光入射, 研究外锥角固定时, 不同内外锥差对 GPC 透镜的焦点尺寸、焦距、数值孔径的影响, 结果如图 11 和图 12 所示。从图 11 的光强分布可以看出, 内外锥差越大, 所得到透

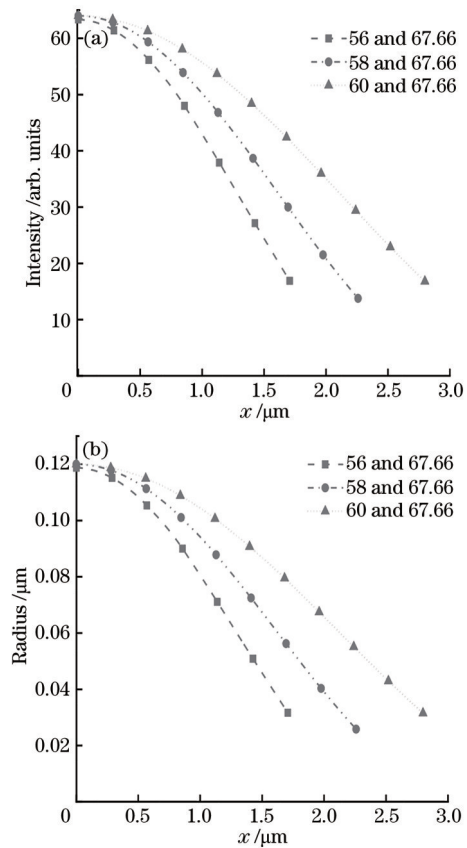


图 9 外锥角 β 固定, 3 种情况沿 x 轴从透镜结构中心往边缘方向的 GPC 结构。(a)强度分布图; (b)透镜介质柱半径分布

Fig. 9 GPC structures along the x -axis from the positive center of the lens structure toward the edge for the three cases when the outer cone β is fixed. (a) Intensity distribution; (b) radius distribution of lens media column

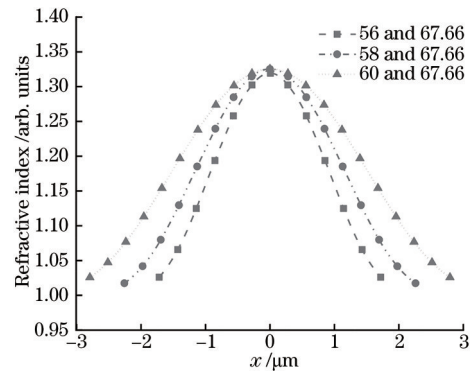


图 10 β 固定, 三种 GPC 透镜沿 x 轴的有效折射率

Fig. 10 Effective refractive index of the three GPC lenses along the x -axis when the outer cone β is fixed

镜的焦距越短。图 12 表示沿透镜 z 轴和 x 轴的光强分布。图 12(a) 给出随着内锥角的减小, 透镜焦距变化为 6.4、4.5、2.25 μm , 图 12(b) 给出相应焦点的尺寸分别是 0.75、0.66、0.494 μm 。按照图 3(b) 计算得到的数值孔径分别是 0.401、0.449、0.605。结果表明, 固定外锥角, 内外锥差越大, 焦距越短, 焦点尺寸越小、数值孔径越大。

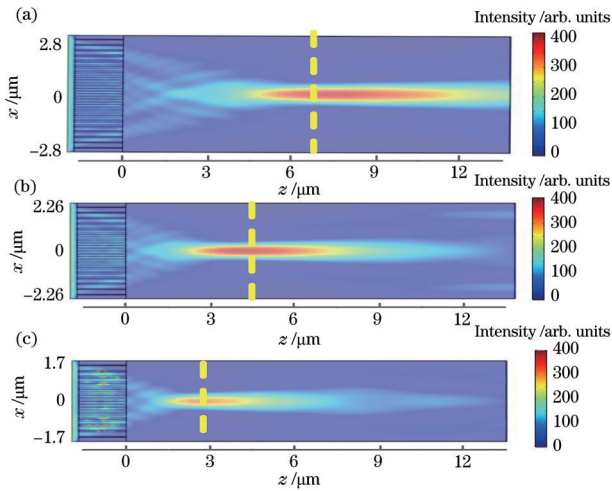


图 11 外锥角 β 固定, 三种 GPC 透镜在 x - z 面的强度分布。
(a) $\theta=60^\circ, \beta=67.66^\circ$; (b) $\theta=58^\circ, \beta=67.66^\circ$;
(c) $\theta=56^\circ, \beta=67.66^\circ$

Fig. 11 Intensity distribution of the three GPC lenses in the x - z plane when the outer cone angle β is fixed. (a) $\theta=60^\circ$ and $\beta=67.66^\circ$; (b) $\theta=58^\circ$ and $\beta=67.66^\circ$; (c) $\theta=56^\circ$ and $\beta=67.66^\circ$

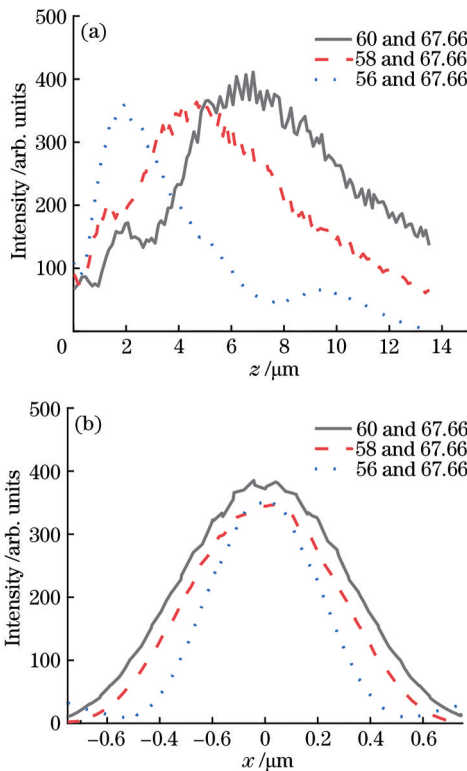


图 12 外锥角 β 固定, 三种 GPC 透镜的聚焦特性。(a) 沿 z 轴的强度分布; (b) 沿 x 轴焦面上的强度分布
Fig. 12 Focusing characteristics of the three GPC lenses when the outer cone angle β is fixed. (a) Intensity distribution along z -axis; (b) intensity distribution along x -axis focal plane

3.3 偏振的影响

从 2.1.1 节可知, 8 束光的偏振方向会影响双锥干涉光强的分布阵列。为研究偏振对 GPC 透镜聚焦特

性的影响。图 13(a) 给出了 $\beta=67.66^\circ, \theta=56^\circ$ 时偏振方向对于沿 x 轴从透镜结构中心往边缘方向的介质柱半径分布的影响, 偏振方向使得介质柱变化梯度变小。由图 13(b) 可知, 偏振方向变化使得透镜中心与边缘的折射率梯度变小。

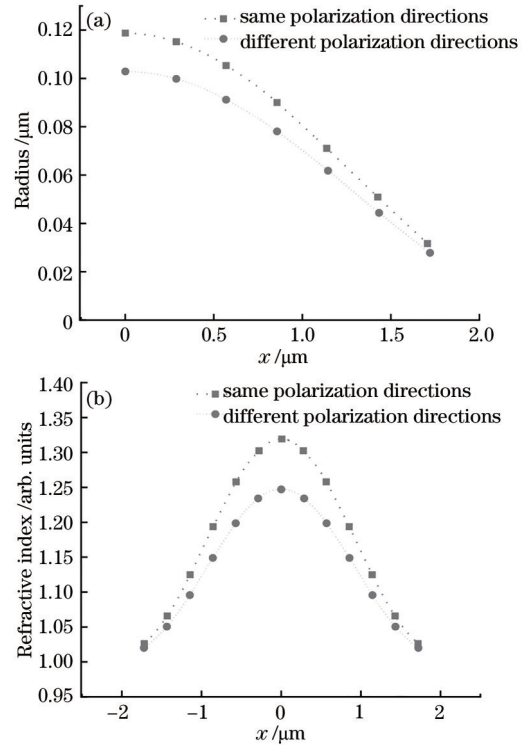


图 13 $\beta=67.66^\circ, \theta=56^\circ$, 偏振角对于结构的影响。(a) 偏振角对于沿 x 轴从中心到边缘的介质柱半径分布的影响; (b) 偏振角对于沿 x 轴的有效折射率的影响

Fig. 13 Effect of polarization angle on structure when $\beta=67.66^\circ$ and $\theta=56^\circ$. (a) Effect of polarization angle on the radius distribution of the dielectric column from the center to the edge along the x -axis; (b) effect of polarization angle on the effective refractive index along the x -axis

选择 TM 模式、 $\lambda=0.632 \mu\text{m}$ 的红光入射, 研究偏振对 GPC 透镜的焦点尺寸、焦距、数值孔径的影响, 结果如图 14 和图 15 所示。从图 14 的光强分布可以看出, 偏振角度都为 0° 时 GPC 透镜的焦距更短、聚焦效果更好。图 15 表示透镜沿 z 轴和 x 轴的光强分布。

图 15(a) 给出偏振对焦距的影响, 透镜焦距分别为 $2.25 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m}$, 图 15(b) 给出相应焦点的尺寸分别是 $0.494 \mu\text{m}, 0.66 \mu\text{m}$ 。按照图 3(b) 计算得到的数值孔径分别是 $0.605, 0.498$ 。结果表明, 偏振使得 GPC 透镜的聚焦强度变小, 焦点尺寸越大、数值孔径越小。根据透镜焦斑大小和数值孔径之间的关系^[18], 两种透镜的焦点尺寸大于超振荡判据且小于瑞利判据, 属于亚衍射焦斑尺寸, 故可以实现亚衍射极限聚焦。

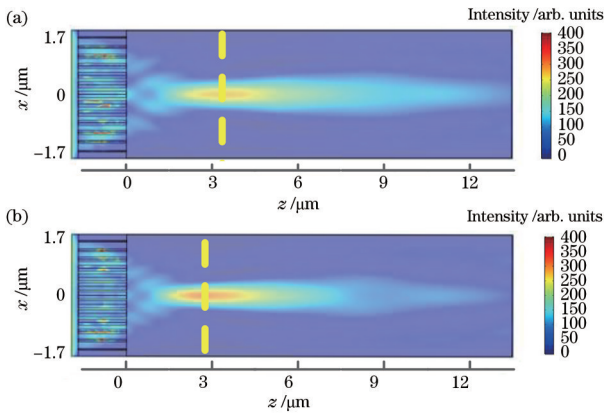


图 14 GPC 透镜在 x - z 面的强度分布。(a) 偏振方向不同时的强度分布;(b) 偏振方向相同且为 0° 时的强度分布

Fig. 14 Intensity distribution of the GPC lenses in the x - z plane. (a) Intensity distribution of different polarization directions; (b) intensity distribution when all the polarization directions are 0°

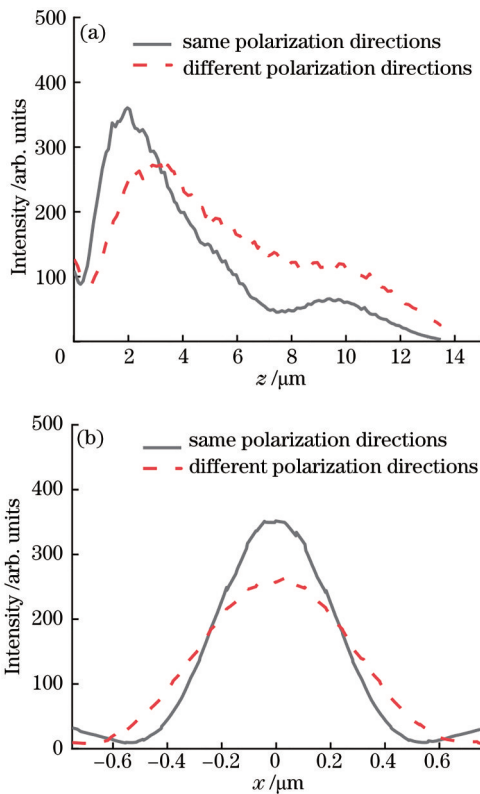


图 15 偏振角对于 GPC 透镜的聚焦特性的影响。(a) 沿 z 轴的强度分布;(b) 沿 x 轴焦面上的强度分布

Fig. 15 Effect of polarization angle on the focusing characteristics of the GPC lens. (a) Intensity distribution along z -axis; (b) intensity distribution along x -axis focal plane

4 结 论

利用 $4+4$ 光束双锥干涉法设计了双周期 GPC 结构,以此结构为基础设计了介质柱尺寸渐变的 GPC 透镜结构,且研究了干涉模型参数对透镜聚焦性能、数值

孔径的影响。研究表明,所设计的透镜即使受到偏振影响,也能实现亚衍射极限的聚焦效果,该工作对透镜在集成光子学领域的应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Hassan S, Lowell D, Adewole M, et al. Extraordinary light-trapping enhancement in silicon solar cell patterned with graded photonic super-crystals[J]. Photonics, 2017, 4(4): 50.
- [3] Qi Y L, Sun X H, Wang S, et al. Design of double-period graded photonic structure by multi-fiber interferometer [J]. Applied Physics B, 2019, 125(9): 178.
- [4] 王航, 赵大鹏, 刘瑞煌, 等. 可见光、远红外与多种激光兼容的隐身光子晶体[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 181602.
- [5] Wang H, Zhao D P, Liu R H, et al. Compatible stealth photonic crystal for visible-light, far-infrared, and multi-wavelength lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 181602.
- [6] 王明寿. 基于梯度光子晶体结构的“光学黑洞”设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [7] Wang M S. The design of “optical black hole” based on gradient photonic crystal structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [8] 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.
- [9] Xie J L, Wang J Z, Ge R, et al. Multiband super-resolution imaging of graded-index photonic crystal flat lens[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(20): 205103.
- [10] 刘薇, 孙晓红, 王帅, 等. Sun-flower型渐变光子晶体自聚焦透镜[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1120002.
- [11] Liu W, Sun X H, Wang S, et al. Self-focusing lens in Sun-flower graded photonic crystal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 1120002.
- [12] Rezaei B, Giden I H, Kurt H. Tuning light focusing with liquid crystal infiltrated graded index photonic crystals[J]. Optics Communications, 2017, 382: 28-35.
- [13] 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.
- [14] Lutkenhaus J, George D, Arigong B, et al. Holographic fabrication of functionally graded photonic lattices through spatially specified phase patterns[J]. Applied Optics, 2014, 53(12): 2548-2555.
- [15] Guo X W, Du J L, Guo Y K, et al. Large-area surface-plasmon polariton interference lithography[J]. Optics

- Letters, 2006, 31(17): 2613-2615.
- [13] Lai N D, Liang W, Lin J, et al. Fabrication of two- and three-dimensional periodic structures by multi-exposure of two-beam interference technique[J]. Optics Express, 2005, 13(23): 9605-9611.
- [14] Qi Y L, Sun X H, Wang S. Fabrication of double-periodic graded photonic crystal array[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10818: 108182A.
- [15] 孙晓红, 武凡, 王帅蒙, 等. 利用双参数六角棱镜干涉法设计渐变光子晶体透镜阵列[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0222002.
Sun X H, Wu F, Wang S M, et al. Design of gradient photonic crystal lens array using two-parameter hexagonal prism interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0222002.
- [16] 武凡, 孙晓红, 曾勇, 等. 双周期渐变光子晶体结构及其纳米聚焦效应[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0113001.
Wu F, Sun X H, Zeng Y, et al. Investigation of double-period gradient photonic crystal structures and nano-focusing effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0113001.
- [17] Sheng J, Xie J L, Liu J J. Multiple super-resolution imaging in the second band of gradient lattice spacing photonic crystal flat lens[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(12): 5-10.
- [18] 何俊, 黄坤, 庄继成. 基于人工微纳结构的平板衍射透镜[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(7): 1200-1221, 1233.
He J, Huang K, Zhuang J C. Planar diffractive lenses with artificial micro/nano-structures[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(7): 1200-1221, 1233.
- [19] Minn K, Birmingham B, Ko B, et al. Interfacing photonic crystal fiber with a metallic nanoantenna for enhanced light nanofocusing[J]. Photonics Research, 2021, 9(2): 252-258.
- [20] Liao J L, Gao Y, Sun Y L, et al. Effects of third-order dispersion on temporal soliton compression in dispersion-engineered silicon photonic crystal waveguides[J]. Photonics Research, 2020, 8(5): 729-736.