

双周期渐变光子晶体结构及其纳米聚焦效应

武凡, 孙晓红*, 曾勇, 王帅蒙, 齐勇乐

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 450052

摘要 利用 3+3 光束双锥干涉法设计了双周期渐变光子晶体结构阵列, 并研究了它的纳米聚焦效应。通过调整内锥角和内外锥的增量角来改变光子晶体晶格的小周期及光子阵列的大周期, 通过调整光束强度、偏振方向来实现渐变光子晶体晶格结构、形状等参数的改变。采用傅里叶变换的方法研究了光子晶体结构对光场的纳米聚焦效应。该结构对于提高发光二极管的提取效率、光显示、光耦合及光集成具有非常重要的意义。

关键词 光学设计; 物理光学; 双周期渐变光子晶体; 双锥干涉; 纳米聚焦

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0113001

Investigation of Double-Period Gradient Photonic Crystal Structures and Nano-Focusing Effect

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

Henan Key Laboratory of Laser and Opto-Electric Information Technology, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China

Abstract Herein, a double-periodic photonic crystal structure array is designed by double-cone interferometry using 3+3 beams, and nano-focusing effect is studied as well. The small period of photonic crystal lattice and large period of photonic array can be changed by adjusting the incremental angle between inner and outer cones. The structure and shape of gradient photonic crystal lattice can be changed by adjusting the intensity and polarization direction of the beam. Fourier transform method is used to study the nano-focusing effect of the designed photonic crystal structure. The structure is very important for improving the extraction efficiency, optical display, optical coupling, and optical integration of light emitting diodes.

Key words optical design; physical optics; double-period gradient photonic crystal; double cone interference; nano-focusing

OCIS codes 220.3740; 220.4000; 090.2880; 230.6120

1 引 言

20 世纪 80 年代, 光子晶体^[1-2]的概念被提出。光子晶体具有能调节光子运动状态的特殊性质, 已被广泛应用于光子晶体激光器^[3-4]、光波导^[5]、传感器^[6]等。人们对光子晶体的性质、制备工艺和应用等进行了广泛研究。至今, 光子晶体发展经历了三个阶段。传统的周期性光子晶体存在光子带隙, 因此能调节光子的运动状态。第二代周期性光子晶体具有超晶格结构, 与其他的吸光材料结合后可以有效增强宽带光的吸收^[7-9]。未来的周期性光子晶

体, 即具有双周期渐变的光子晶体^[10-14], 折射率呈梯度变化, 具有高的空间分辨率, 可以用于透镜的设计制造^[15]和太阳能的光伏发电^[16]。随着光子晶体研究的深入, 光子晶体结构趋向复杂化, 光子晶体的制备方法也越来越多, 目前主要采用的制备方法有纳米压印光刻^[17]、胶体自组装^[18]、电子束刻蚀^[19]和激光全息光刻^[20-22]等。激光全息光刻是将多束光会聚干涉形成的周期性图案刻蚀在感光材料上的一种技术, 通过控制光束的光学参数可以形成不同样式的周期性结构, 是大面积制造光子晶体的有效方法。与其他光子晶体的制备方法相比, 激光全息光刻具有效率

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-08-25; 录用日期: 2019-10-14

基金项目: 河南省重大科技专项(161100210200)

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

高、操作性好等优点。

文献[22]详细介绍了基于相位空间光调制器(SLM)的双周期渐变光子晶体结构的设计制作方法。本文在其所提出的双锥干涉模型的基础上,讨论了光束内锥角、增量角、光强及偏振等参数对所设计的渐变光子晶体结构的晶格常数、阵列周期、晶格形状等的影响,然后利用傅里叶变换方法研究了渐变光子晶体的聚焦特性。

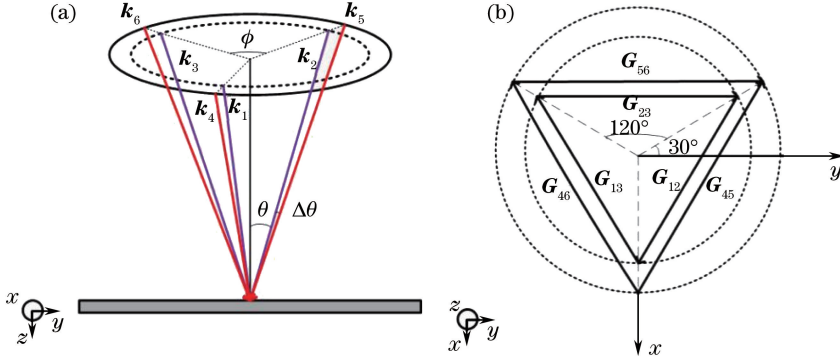


图1 双锥干涉模型。(a)主视图;(b)俯视图

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

图1(a)是双锥干涉模型的主视图,其中: \mathbf{k}_1 、 \mathbf{k}_2 、 \mathbf{k}_3 是内锥光束的波矢; \mathbf{k}_4 、 \mathbf{k}_5 、 \mathbf{k}_6 是外锥光束的波矢; θ 是内锥角,即内锥光束与 z 坐标的夹角; $\Delta\theta$ 是增量角,即内锥光束与外锥光束之间的夹角; $\phi = 120^\circ$,是相邻两光束在 x - y 平面投影的夹角。图1(b)是双锥干涉在 x - y 平面的俯视图,从俯视图中可以清楚地观察双锥光束中两光束的倒格矢,其表达式为

$$\mathbf{G}_{lm} = \mathbf{k}_l - \mathbf{k}_m, \quad (1)$$

式中: \mathbf{G}_{lm} 为倒格矢; \mathbf{k}_l 和 \mathbf{k}_m 分别为第 l 和第 m 束光的波矢。波矢 \mathbf{k} 的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{k}_l = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \varphi_l \sin \theta_l, \sin \varphi_l \sin \theta_l, \cos \theta_l], \\ 1 \leq l \leq 3 \\ \mathbf{k}_m = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \varphi_m \sin \theta_m, \sin \varphi_m \sin \theta_m, \cos \theta_m], \\ 4 \leq m \leq 6 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{k}_l 表示第 l 束内锥光束的波矢; \mathbf{k}_m 表示第 m 束外锥光束的波矢; λ 为光束波长; φ 为光束在 x - y 平面上的投影与 x 轴的夹角。这里使用的激光器波长为355 nm。

假定双锥干涉模型中的6束光全部为线偏振光,则

$$\mathbf{J}(\varphi_l) = [\cos \varphi_l, \sin \varphi_l, 0], \quad (3)$$

2 双锥干涉模型

激光全息光刻的原理是利用多光束干涉理论,形成稳定性变化的周期性图案,并将其记录在光敏材料上,形成具有一定应用的器件结构。本文在双锥干涉模型的基础上,研究了内锥角、增量角、光强、偏振等光学参数对干涉所形成的光子结构的影响,并对该干涉模型进行仿真,发现了新的光子结构。

式中: $\mathbf{J}(\varphi_l)$ 为光束 l 的琼斯矩阵; φ_l 为第 l 束光的偏振角。

旋转矩阵为

$$\mathbf{R}(\theta_l, \varphi_l) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_l \cos \theta_l & -\sin \varphi_l & \cos \varphi_l \sin \theta_l \\ \sin \varphi_l \cos \theta_l & \cos \varphi_l & \sin \varphi_l \sin \theta_l \\ -\sin \theta_l & 0 & \cos \theta_l \end{bmatrix}, \quad (4)$$

通过旋转矩阵将光束的偏振映射到 x - y 平面上。

第 l 束光的光强为

$$\mathbf{E}_l(\mathbf{r}) = E_l \exp(i\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r} + i\delta_l) \mathbf{e}_l, \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{e}_l = \mathbf{R}(\theta_l, \varphi_l) \mathbf{J}(\varphi_l), \quad (6)$$

式中: E_l 为第 l 束光束的振幅; $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ 为光束的位置矢量; δ_l 为第 l 束光束的初相位。(6)式表示对琼斯矩阵进行旋转,将6束光的偏振映射到 x - y 平面上。

因此,内外锥6束光的干涉光强为

$$I(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{\text{tot}} \cdot \mathbf{E}_{\text{tot}}^*, \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{E}_{\text{tot}} = \sum_{l=1}^6 \mathbf{E}_l(\mathbf{r}), \quad (8)$$

式中: \mathbf{E}_{tot} 表示全部光束的电场强度之和; $\mathbf{E}_{\text{tot}}^*$ 表示 \mathbf{E}_{tot} 的共轭; $I(\mathbf{r})$ 用来表示所形成周期性干涉图案的辐照度分布。

3 双周期渐变光子晶体结构

3.1 内锥角和增量角对光子结构的影响

本节与 3.2 节考虑的是 3 束内锥光束与 3 束外锥光束偏振态完全相同的情况。将参数 $\theta = 20^\circ$, $\Delta\theta = 10^\circ$, $\lambda = 355 \text{ nm}$, 代入(1)~(7)式就可得到图 2 (a)所示的光子结构图,在干涉图案中可以明显地观察到双周期渐变结构。采用同样的方法得到了 $\Delta\theta = 10^\circ$ 、 $\theta = 30^\circ$ 以及 $\Delta\theta = 10^\circ$ 、 $\theta = 40^\circ$ 时的计算结果,如图 2(b)、(c)所示。在图 2(b)中,用 p 表示光子结构阵列的大周期,即超原胞; l 表示光子晶体的

小周期,即晶格周期。观察图 2(a)发现在一个超原胞内光学格点的个数较少,晶格周期 l 较大;将图 2 (b)、(c)与图 2(a)比较后可知,大周期 p 保持不变,在一个小周期内光学格点数目增多,晶格周期 l 减小。综上可以得到:增量角 $\Delta\theta = 10^\circ$ 不变时,随着内锥角增大,所得到的光子结构阵列的大周期 p 不变,而在一个周期内光学格点数目增加,小周期 l 减小。为了更清楚地定量观察结构的周期性变化情况,分别给出相应的 $x = 0$ 轴上的光强分布,如图 2 (d)~(f)所示。大周期 p 保持不变,为 $2.44 \mu\text{m}$,光子结构的小周期 l 依次为 $534, 405, 355 \text{ nm}$ 。

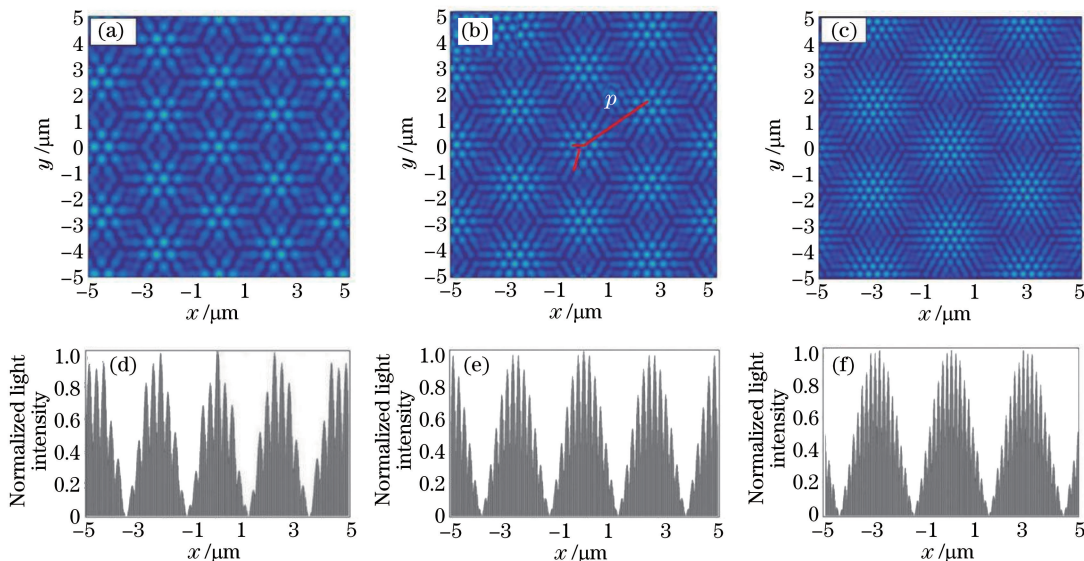


图 2 增量角 $\Delta\theta = 10^\circ$ 的情况下,内锥角增大时所形成的光子结构和周期图。(a) $\theta = 20^\circ$ 时的光子结构;(b) $\theta = 30^\circ$ 时的光子结构;(c) $\theta = 40^\circ$ 时的光子结构;(d) $\theta = 20^\circ$ 时的周期图;(e) $\theta = 30^\circ$ 时的周期图;(f) $\theta = 40^\circ$ 时的周期图

Fig. 2 Photonic structures and period pictures formed when the inter cone angle is increasing and the incremental angle is $\Delta\theta = 10^\circ$. (a) Photonic structure when $\theta = 20^\circ$; (b) photonic structure when $\theta = 30^\circ$; (c) photonic structure when $\theta = 40^\circ$; (d) period picture when $\theta = 20^\circ$; (e) period picture when $\theta = 30^\circ$; (f) period picture when $\theta = 40^\circ$

下面讨论内锥角 $\theta = 30^\circ$ 保持不变,增量角由 2° 增大到 10° 时,光子结构的周期性变化情况,如图 3 (a)~(c)所示。从图中可以发现:在相同的坐标范围内,图 3(b)、(c)中的周期阵列逐渐增多。综上可以得到量化的结果:内锥角 $\theta = 30^\circ$ 不变,随着增量角增大,得到的光子结构的小周期 $l = 451 \text{ nm}$ 保持不变,大周期 p 逐渐减小,依次为 $12.45, 4.89, 2.44 \mu\text{m}$ 。

以上研究表明:在增量角不大时,增量角不变,改变内锥角 θ ,仅会明显改变光子晶体结构的小周期;内锥角不变,改变增量角 $\Delta\theta$,仅会明显改变光子晶体结构的大周期。由此可知,通过适当地改变干涉模型的内锥角 θ 和增量角 $\Delta\theta$,可以得到不同的双周期光子结构。

3.2 光束强度对光子结构的影响

在激光全息光刻方法中,不同光束的光强并不总是相等的,光强不同对所形成的光子结构的影响不同,所以研究光强对所形成的光子结构的影响同样重要。

在内锥角 $\theta = 30^\circ$ 、增量角 $\Delta\theta = 10^\circ$ 的条件下,研究内外锥光束强度变化所形成的光子结构。图 4 (a)为内锥光束光强 I_{in} 变为原来的 1.5 倍时所形成的光子结构,图 4(b)为内锥光束光强 I_{in} 变为原来的 2 倍时所形成的光子结构,将得到的光子结构与图 2(b)进行对比,发现光子结构并没有发生变化,但在一个周期内的光强最大值增大了,光子结构的衬比度变大了,清晰度更高。图 4(c)和图 4(d)分别为外锥光束光强 I_{out} 变为原来的 1.5 倍和 2 倍时

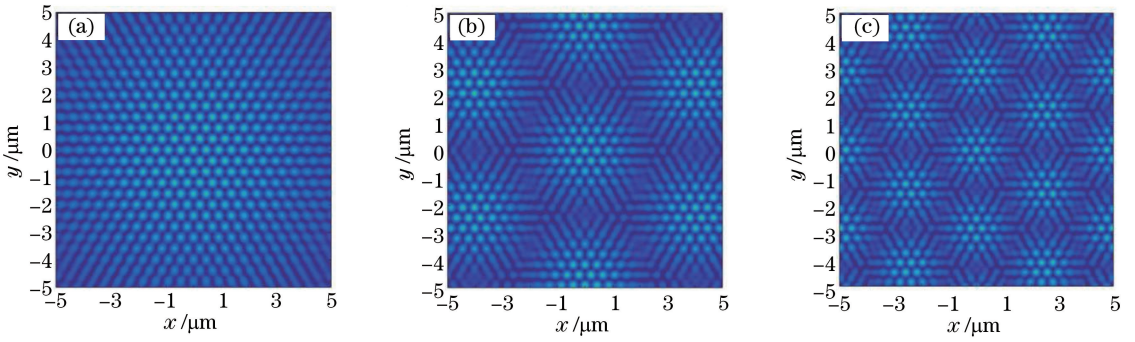


图 3 内锥角 $\theta=30^\circ$ 不变, 增量角 $\Delta\theta$ 增大时得到的光子结构图。(a) $\Delta\theta=2^\circ$; (b) $\Delta\theta=6^\circ$; (c) $\Delta\theta=10^\circ$

Fig. 3 Photonic structure diagrams obtained when the incremental angle $\Delta\theta$ is increasing and the inner cone angle $\theta=30^\circ$. (a) $\Delta\theta=2^\circ$; (b) $\Delta\theta=6^\circ$; (c) $\Delta\theta=10^\circ$

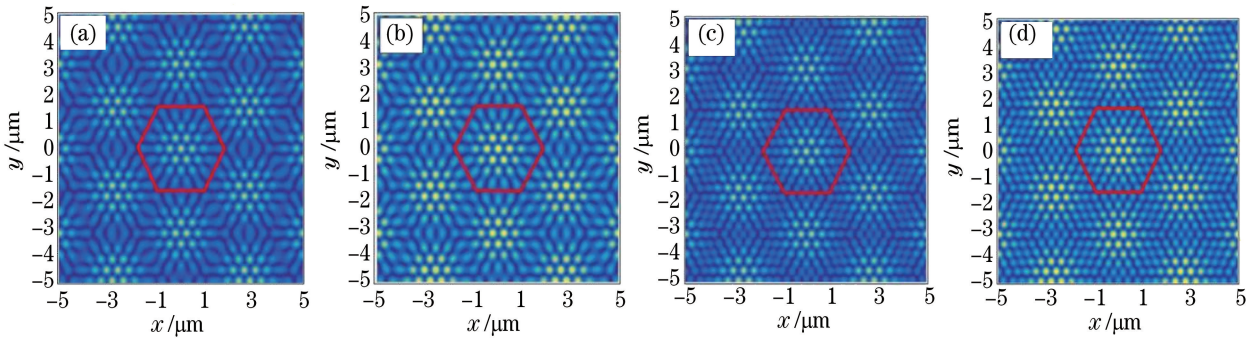


图 4 在不同的内锥光束光强与外锥光束光强下得到的光子结构。(a) $I_{in}=1.5, I_{out}=1$;

(b) $I_{in}=2, I_{out}=1$; (c) $I_{in}=1, I_{out}=1.5$; (d) $I_{in}=1, I_{out}=2$

Fig. 4 Photonic structures obtained by changing the intensities of inner and the outer cone beams.

(a) $I_{in}=1.5, I_{out}=1$; (b) $I_{in}=2, I_{out}=1$; (c) $I_{in}=1, I_{out}=1.5$; (d) $I_{in}=1, I_{out}=2$

所形成的光子结构, 将所形成的光子结构进行对比, 发现当外锥光束的光强变大时, 一个大周期内光子结构的边缘结构更好。

综上所述, 内锥光束与外锥光束的光强差异会影响光子晶体的边缘结构。内锥光束与外锥光束的光强一样, 当外锥光束的光强变大时, 所形成的光子晶体的小周期的边缘结构更好; 内锥光束的光强变大时, 所形成的光子晶体的小周期的边缘结构差。

为了更清楚地观察光强变化产生的效果, 给出图 4 中一个周期内从中心到边缘的干涉光强分布 (已进行归一化处理), 如图 5 所示。观察图形可以得出, 当内锥光束的光强或外锥光束的光强增加相同的倍数时, 所形成的光学格点强度的最大值、最小值是相同的, 可以观察到所形成的光子晶体结构的衬比度 (光强最大值与光强最小值的比值) 的变化是相同的。而且增大内锥或外锥光束的强度, 所形成的干涉图的光强梯度也随之增加, 这为设计制作不同折射率梯度的渐变光子晶体透镜提供了参考。

3.3 偏振对光子结构的影响

本部分内容考虑线偏振光偏振方向对光子结构

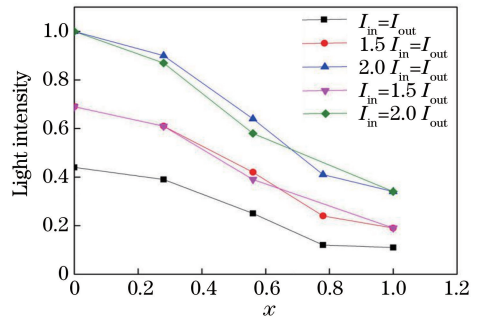


图 5 不同的内外锥光束强度下的光学格点分布

Fig. 5 Optical lattice distribution when the intensities of the inner and outer cone beams are different

的影响。考虑到内锥光束与外锥光束的偏振组合可以有多个, 在这里就不一一列举图形, 只列出一些特殊的光子结构。当内锥角、增量角、内外锥光束强度相同, 改变内锥光束与外锥光束的偏振, 使内锥光束与外锥光束的线偏振角度不同, 双锥干涉得到的光子结构不同。对比 3.1 节和 3.2 节中内锥光束与外锥光束为相同偏振态的情况可以发现, 当内锥光束与外锥光束为偏振方向存在夹角的线偏振时, 干涉形成的光子结构的边缘呈螺旋状。

图 6 给出当内锥光束偏振角为 20° 、外锥光束偏振角为 90° 时所形成的光子结构,可以发现所形成的光学格点在边缘处发生了变形,整个光子结构呈

旋转状,而且随着偏振角组合的不同会产生一些有趣的旋光结构,这部分内容将在后期的工作中单独讨论。

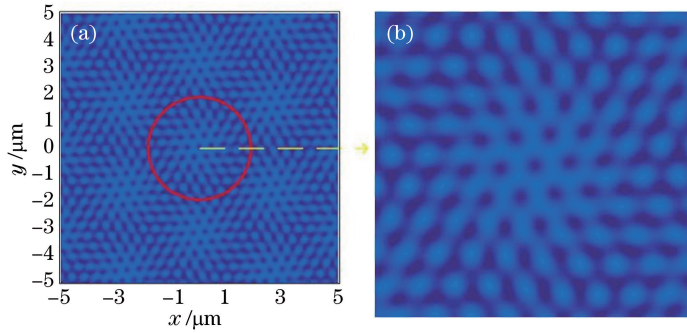


图 6 内外锥光束使用不同的线偏振形成的光子结构。(a)全貌;(b)局部放大

Fig. 6 Photonic structures formed under different linear polarizations of inner and outer cone beams.

(a) Full view; (b) partially enlarged detail

4 渐变光子晶体结构的纳米聚焦效应

对图 3(a)所示的光子结构进行傅里叶变换,即取双周期渐变光子结构的一个超原胞进行傅里叶变换,以研究渐变光子晶体的聚焦特性。采用傅里叶变换得到的结果如图 7(a)所示,可见,这一结构可以充当光子晶体透镜,对入射的空间光实现纳米聚焦^[23]。依据入射强度归一化,将均匀平面波正入射

到如图 3(a)所示的结构,得到 $y=0$ 处沿 x 方向的光强分布,如图 7(b)所示。由图 7(b)可知,光束通过光子晶体透镜后发生了聚焦,焦斑的半峰全宽为 32 nm ,即焦斑的尺寸在纳米级,说明该透镜具有良好的纳米聚焦效果。

双周期渐变光子晶体结构可有望成为一种可集成在微光学系统中的聚焦透镜,实现纳米尺度上的聚焦、耦合等功能。

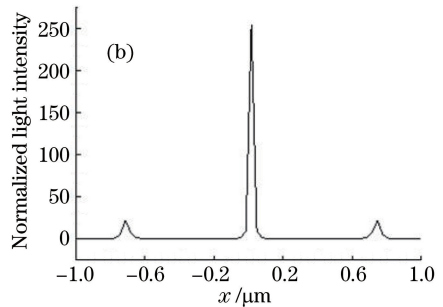
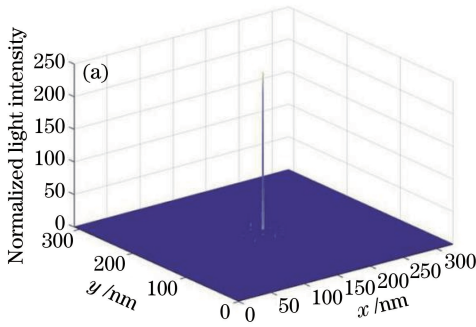


图 7 对双周期渐变光子结构的一个超原胞进行傅里叶变换的结果。(a)三维强度;(b)焦斑的半峰全宽

Fig. 7 Results of original cell of double-period gradient photonic structure processed by Fourier transform.

(a) Three-dimensional intensity; (b) full width at half maximum of focal spot

5 结 论

本文采用双锥干涉法设计了二维双周期渐变光子结构,研究了内锥角、增量角、内外锥光束强度及偏振对光子结构的影响;将双周期渐变光子结构的一个超原胞进行傅里叶变换,对渐变光子晶体的纳米聚焦效应进行了讨论。这项研究对制作不同折射率梯度的光子晶体透镜及实现纳米聚焦具有非常重要的意义。

参 考 文 献

- [1] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [2] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [3] Seo M K, Kang J H, Kim M K, et al. Wavelength-scale photonic-crystal laser formed by electron-beam-induced nano-block deposition [J]. Optics Express,

- 2009, 17(8): 6790-6798.
- [4] Zhou X Y, Zhao S Y, Ma X L, et al. Low vertical divergence angle and high brightness photonic crystal semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201010.
周旭彦, 赵少宇, 马晓龙, 等. 低垂直发散角高亮度光子晶体半导体激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201010.
- [5] Vlasov Y A, O'Boyle M, Hamann H F, et al. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides[J]. Nature, 2005, 438(7064): 65-69.
- [6] Zhu C H, Tan C, Wang Y, et al. Photonic crystal fiber high sensitivity magnetic field and temperature sensor based on surface plasma resonance effect and defect coupling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0310001.
朱晟昇, 谭策, 王琰, 等. 基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场与温度传感器 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0310001.
- [7] 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.
- [8] Yamada N, Ijio T, Okamoto E, et al. Characterization of antireflection moth-eye film on crystalline silicon photovoltaic module [J]. Optics Express, 2011, 19(S2): A118-A125.
- [9] Hendrickson J, Guo J P, Zhang B Y, et al. Wideband perfect light absorber at midwave infrared using multiplexed metal structures [J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 371-373.
- [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] Lowell D, Hassan S, Adewole M, et al. Holographic fabrication of graded photonic super-crystals using an integrated spatial light modulator and reflective optical element laser projection system [J]. Applied Optics, 2017, 56(36): 9888-9891.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] Liu W, Sun X H, Gao M L, et al. Luneburg and flat lens based on graded photonic crystal [J]. Optics Communications, 2016, 364: 225-232.
- [16] Rinnerbauer V, Lausecker E, Schäffler F, et al. Nanoimprinted superlattice metallic photonic crystal as ultraselective solar absorber [J]. Optica, 2015, 2(8): 743-746.
- [17] Li J S, Li Y L, He D Y, et al. Design and mechanism of cost-effective and highly efficient ultrathin (0.5 μm) GaAs solar cells employing nano/micro-hemisphere surface texturing [J]. AIP Advances, 2013, 3(3): 032145.
- [18] Xiu Y H, Zhu L B, Hess D W, et al. Biomimetic creation of hierarchical surface structures by combining colloidal self-assembly and Au sputter deposition [J]. Langmuir, 2006, 22(23): 9676-9681.
- [19] Subramania G, Lin S Y. Fabrication of three-dimensional photonic crystal with alignment based on electron beam lithography [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(21): 5037-5039.
- [20] Behera S, Sarkar S, Joseph J. Fabrication of helical photonic structures with submicrometer axial and spatial periodicities following "inverted umbrella" geometry through phase-controlled interference lithography [J]. Optics Letters, 2018, 43(1): 106-109.
- [21] Behera S, Kumar M, Joseph J. Submicrometer photonic structure fabrication by phase spatial-light-modulator-based interference lithography [J]. Optics Letters, 2016, 41(8): 1893-1896.
- [22] 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.
- [23] Lü N G. Fourier optics [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 243-245.
吕乃光. 傅里叶光学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 243-245.