

文章编号: 1005-5630(2022)06-0029-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.006.005

基于梯度折射率光子晶体可调谐亚波长 聚焦特性的研究

黄 燕, 梁斌明

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 本文对梯度折射率光子晶体的亚波长聚焦特性进行了研究。该光子晶体是由硅和圆形空气孔构成的平行平板, 通过改变空气孔的结构来实现折射率的梯度渐变。采用时域有限差分 (finite-different time-domain, FDTD) 算法对光子晶体的聚焦过程进行仿真分析。研究发现, 适当地修正光程差可以大大地提高聚焦效果, 同时焦距和中心空气孔的结构对聚焦效果也有影响。综合以上3种要素, 最终设计出的梯度折射率光子晶体平板可实现较好的亚波长聚焦效果, 其中在光子晶体外部 1.45λ 处的光斑最佳, 半宽值可达到 0.3447λ 。为了提升应用性能, 设计了一个动态的调焦系统。在该光子晶体中加入半导体制冷片来调节温度, 通过改变温度可以实现 $1.1374\lambda \sim 2.6264\lambda$ 的焦点调谐, 同时焦斑半宽均小于 0.4λ 。

关键词: 梯度折射率光子晶体; FDTD 算法; 亚波长聚焦; 半宽
中图分类号: TB 811+4 **文献标志码:** A

Tunable sub-wavelength focusing properties in gradient negative refractive index photonic crystals

HUANG Yan, LIANG Binming

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The focus of this paper is the sub-wavelength imaging of gradient index photonic crystals. The gradient index photonic crystals is a parallel plate composed of silicon and circular air holes. The gradient change of photon crystal refractive index is realized by adjusting the structure of each column of pores. The focusing process of the gradient index photonic crystals is simulated by finite-different time-domain (FDTD) algorithm. The results showed that proper modification of the optical path difference could greatly optimize the focusing effect. Furthermore, changing the focal length of photonic crystals and the structure of the central air hole could also

收稿日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61975122)

作者简介: 黄 燕 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微纳光学。E-mail: hwangyan0716@163.com

通信作者: 梁斌明 (1977—), 男, 副教授, 研究方向为微纳光学、光子晶体、亚波长成像。
E-mail: liangbinming@sina.com

optimize the focusing effect. By combining the above three elements, the gradient index photonic crystal was finally designed which could realize sub-wavelength focusing. The half-width of the focused spot was 0.3447λ , which was located at 1.45λ outside the photonic crystal. To improve application performance, a dynamic focal length adjustment system was designed on the gradient index photonic crystals. The focal length range of $1.1374 \lambda \sim 2.6264 \lambda$ could be adjusted without changing the structure of gradient index photonic crystals. Meanwhile, the half-width of the focal spot was less than 0.4λ .

Keywords: gradient index photonic crystals; FDTD algorithm; sub-wavelength focusing; half-width

引 言

1987年, John^[1]和 Yablonovitch^[2]分别独立提出光子晶体这一概念。光子晶体的主要特征就是存在光子禁带^[3], 即当电磁波落在光子带隙内时将不能继续传播下去。随后 Luo等^[4]发现二维光子晶体具有负折射效应, 并且在此基础上探究得出光子晶体具有亚波长聚焦能力。除此之外, 光子晶体还可以表现出一些突出特性, 如成像特性^[5]、成像测量^[6]、可调谐光束^[7]、自准直效应^[8]。人们根据这些特性设计出了诸多光学元件, 例如超棱镜^[9]、波导^[10]等。

随着对光子晶体研究的深入, 人们提出了一种新型光子晶体——梯度折射率光子晶体。这一概念最早在 2005年由 Centeno等^[11]提出。研究表明, 通过适当地调整光子晶体中的参数, 如填充因子的结构、晶格常数, 可以得到折射率梯度渐变的光子晶体。这一发现为控制电磁波在光子晶体中的传播过程开辟了一种新途径, 后续的很多光子晶体结构都受到这一理念的启发。人们对梯度折射率光子晶体进一步研究, 发现了许多梯度折射率光子晶体的应用。例如, Singh等^[12]通过改变梯度折射率光子晶体的结构参数, 在选定的频率范围内可以控制和实现理想的光子带。Zhu等^[13]发现梯度折射率光子晶体可以很好地改善由于晶体厚度增加而引起的光输出急剧下降的问题。

利用梯度折射率光子晶体实现超分辨聚焦现在已成为一个重要的研究领域。Li等^[14]通过在光子晶体的中心引入一个空气孔, 实现了在二维

光子晶体中加入点缺陷的结构。结果表明, 在透镜的亚表面和顶表面可以得到较好的聚焦光斑。但由于焦点位置的局限性, 使得该结构在实际运用中比较困难。随后, Rezaei等^[15]提出了一种基于液晶的梯度折射率光子晶体, 通过向液晶施加外部静态电场来调节光子晶体的折射率, 实现光子晶体折射率的梯度渐变。设计出的调焦系统可以实现焦距在 0.255λ 内的可调节。

本文继续研究梯度折射率光子晶体的亚波长聚焦。设计的光子晶体背景为硅, 介质柱为圆形空气孔。通过改变光子晶体中空气孔的结构来实现折射率的梯度渐变。运用平面波展开方法分析能带图, 利用二维时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 方法仿真光在光子晶体中的传播路径, 探究影响梯度折射率光子晶体聚焦效果的因素。数值模拟分析证明, 设计出的梯度折射率光子晶体可在其外部得到一个较小的聚焦光斑。同时, 采用改变梯度折射率光子晶体背景温度的方法设计了一个调焦系统, 该系统可实现焦距在 1.5λ 内的可调节。

1 梯度折射率光子晶体的设计和原理

本文选用的是由圆形空气孔和硅构成的正六角形平行平板结构。光子晶体的结构如图 1(a)所示, 光子晶体的背景为硅 (折射率为 3.42), 圆形介质柱为空气 (折射率为 1), 晶格常数为 a ($a=482 \text{ nm}$), 空气孔半径为 r ($r=0.365 a$)。在该结构下, 选用入射波长 $\lambda=3.344 a$ (1612 nm) 时, 具有较好的实验结果。对光子晶体中的负折

射效应和聚焦效果的研究, 通常是从研究其光子带结构和等频表面轮廓开始的。图 1(b)为通过 Rsoft 中的光子晶体能带结构模拟分析设计软件 BandSOLVE 仿真出的光子晶体第一能带的等频图。图中显示由里向外频率 ω 的值逐渐减小, 此时群速度和相速度相反, 这意味着该入射波长在光子晶体中可以实现负折射现象。同时, 当波长 $\lambda=3.344 a$ 时, 归一化角频率 $\omega_0=a/\lambda=0.299$, 由图 1(b)可得, 此时波矢 $k=3.8438 \mu\text{m}^{-1}$ 。根据折射率公式 $n=k\lambda/(2\pi)$ 得出对应的光子晶体折射率 $n=-0.9847$ 。研究表明, 当等效折射率接近 -1 时, 光子晶体具有亚波长的聚焦能力。

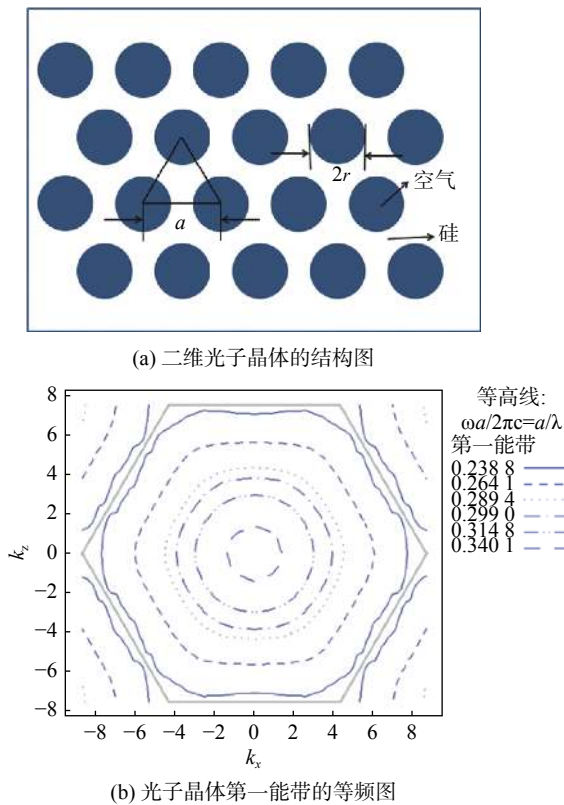
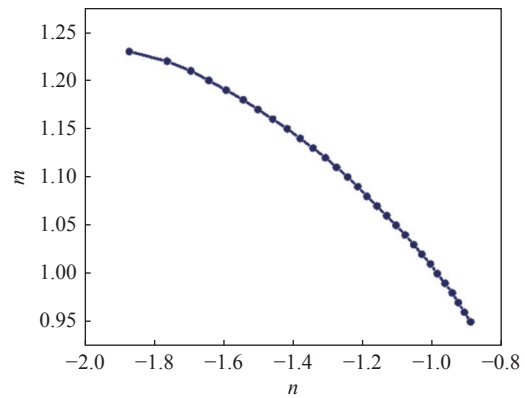


图 1 二维光子晶体结构图与光子晶体第一能带等频图
Fig. 1 The structure of photonic crystals and several EFS contours in the first TE-polarized photonic band of the PC

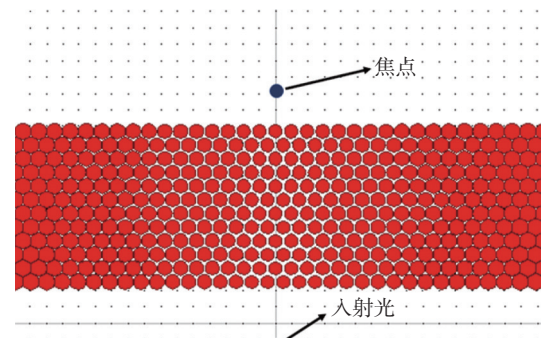
当改变光子晶体中空气孔半径大小时, 等频图中的波矢 k 的值也相应改变。由公式 $n=k\lambda/(2\pi)$ 可知, 若入射波长 λ 不变, 则波矢 k 与光子晶体折射率 n 成正比。由此可得, 光子晶体中的空气孔结构大小与光子晶体的折射率呈一一对应的关系。整体改变光子晶体中空气孔半径, 令 $r' =mr$, 通过多组数据, 得出 m 与其对

应折射率 n 的关系为 $m=-0.21n^2-0.85n+0.36$, 如图 2(a)所示(其中横坐标为光子晶体折射率 n , 纵坐标为空气孔半径相对于 r 变化的倍数 m)。由图可以看出, 空气孔半径越大, 光子晶体的等效折射率越小。

二维光子晶体可以被认为是离散介质, 其中的每一列介质都是离散且均匀的。结合上述得到的空气孔半径与折射率的关系, 可以通过调整光子晶体中每一列空气孔的半径, 来获得折射率在横向上梯度渐变的光子晶体。根据斯涅耳定律^[16], 近轴光束会逐渐向折射率高的方向弯曲。因此本文设计的梯度折射率光子晶体中心折射率最高, 从内向外折射率逐渐减小。该梯度折射率光子晶体的结构如图 2(b)所示。



(a) 光子晶体中空孔半径与折射率的关系



(b) 二维梯度折射率光子晶体的结构设计图

图 2 光子晶体中空孔半径与折射率的关系与二维梯度折射率光子晶体的结构设计图

Fig. 2 The relationship between hollow pore radius and refractive index in photonic crystals and the structural design of two-dimensional graded index photonic crystal

设置每一列的空气孔半径相同, 且由里向外空气孔的半径依次增加, 当平行光从光子晶体的正下方入射时, 经光子晶体折射后, 汇聚在光子

晶体外，从而实现平行光的聚焦。

2 仿真数据和结果讨论

2.1 光子晶体折射率梯度渐变的原理

如图 3(a)所示，通过改变光子晶体中空气孔的尺寸(中间的空气孔尺寸最小，两边空气孔尺寸依次递增)，设计了一个二维的梯度折射率光子晶体。对于一块厚度为 h 的光子晶体，为了实现平行光在焦距为 y 处的聚焦，则需要设计折射率在 x 轴方向渐变。假设中心一列的光子晶体的折射率为 n_0 ，距离中心距离为 x 处的光子晶体的折射率为 n_x 。由于平行光实现聚焦必须满足入射面到聚焦点的光程差相同，即 $n_0h + y = n_xh +$

$\sqrt{x^2 + y^2}$ ，则 $n_x = (n_0h + y - \sqrt{x^2 + y^2})/h$ 。由于在此之前讨论过光子晶体的折射率与空气孔半径的关系，因此可根据 n_x 的值得出该列空气孔的半径。通过空气孔半径的改变从而实现光子晶体折射率的梯度渐变，且该折射率分布满足光程差的要求，在理论上可以实现完美聚焦。在 Rsoft 软件中利用 FDTD 算法，模拟仿真光在光子晶体中的聚焦过程，设置入射光源为高斯光束的平行光。图 3(b)和图 3(c)为根据理论折射率 n_x 设计的光子晶体的聚焦效果和聚焦光斑的半宽图，在该图中半宽为 0.7054λ ，聚焦效果较差。而且此时的聚焦属于小光瞳聚焦，对于不同孔径 x ，产生的负球差^[17]也不同，可通过改变光程与该孔径产生的负球差相抵消，从而优化聚焦效果。在下面的设计中将对其一起进行修正。

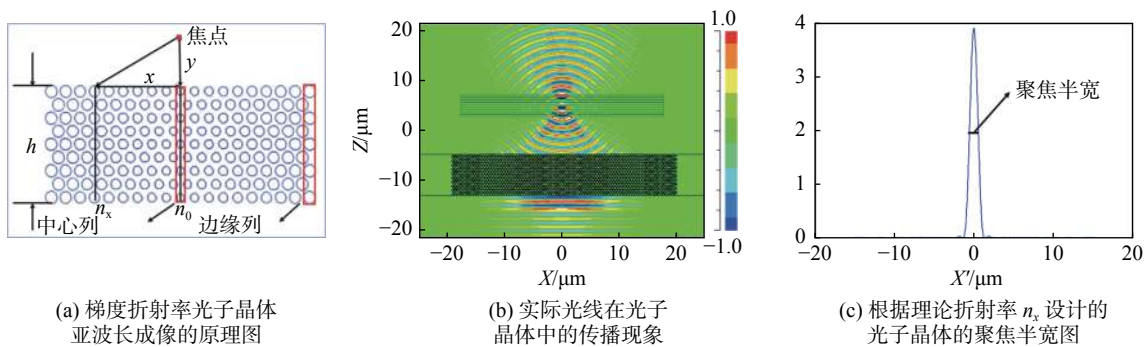


图 3 梯度折射率光子晶体亚波长成像原理

Fig. 3 Schematic diagram of sub-wavelength imaging realized by gradient index PC

2.2 光程差的修正

令 $n_x = (n_0h + y - \sqrt{x^2 + y^2})/h$ 中 $h = 9.64\ \mu\text{m}$ ， $y = 9.8332\ \mu\text{m}$ ，光子晶体中心一列空气孔的半径 $r_0 = 0.9780r$ 。在该梯度折射率光子晶体中，中心的折射率最大，往两边折射率逐渐减小。由于光线总是朝着折射率较高的方向偏折，因此光在该梯度折射率光子晶体中传播时，实际的传播距离应该大于理论值。通过仿真发现，适当的减小光子晶体的折射率，可以优化聚焦效果。对上述的等光程条件进行修正，令修正后折射率 $n'_x = n_x - b\sqrt{x}/h$ (b 值在 $0 \sim 1.2$ 范围内变化)，利用 FDTD 仿真，根据探测器的输出值获得了精确的归一化聚焦半宽如图 4 所示。从图中可以看出，随着 b 的增加，半宽整体呈下降的趋势。另外

当 $b \geq 0.5$ 时，半宽都小于 0.5λ ，此时的光子晶体均可实现亚波长聚焦。并且当 $b = 1.1$ 时，半宽达到最小 0.3878λ 。对比修正前的聚焦半宽，修正后的光子晶体的聚焦效果有了显著的提高。

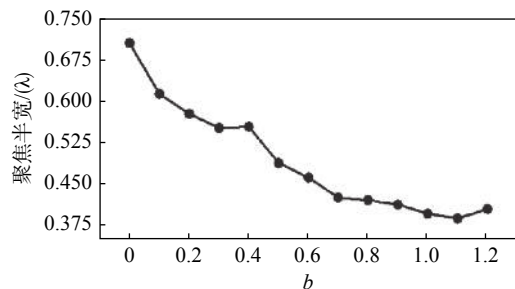


图 4 不同 n'_x 的光子晶体的聚焦半宽

Fig. 4 The half-width of focal spot after modifying the refractive index of the PC

2.3 焦距对聚焦效果的影响

为了获得更佳的聚焦效果, 分析了焦距改变对聚焦光斑的影响。设计 4 种结构的光子晶体 ($b=0.9$ 、 $b=1.0$ 、 $b=1.1$ 、 $b=1.2$)。改变焦距 y (y 在 $1.8332 \sim 9.8332 \mu\text{m}$ 范围内变化), 仿真结果见图 5。可以看出, 在这 4 种 b 值对应的光子晶体中, 半宽值随焦距的变化趋势基本相同, 当厚度为 $9.64 \mu\text{m}$ 时, 均在焦距为 $3.8 \mu\text{m}$ 附近取得最小半宽。并且根据研究, 取得最小半宽的焦距与光子晶体的厚度成正比。

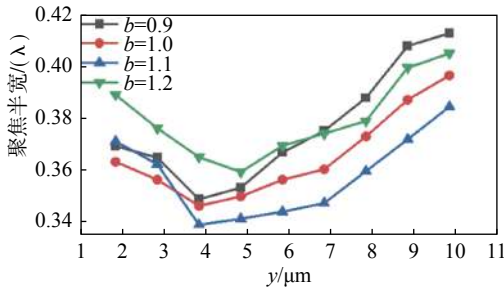
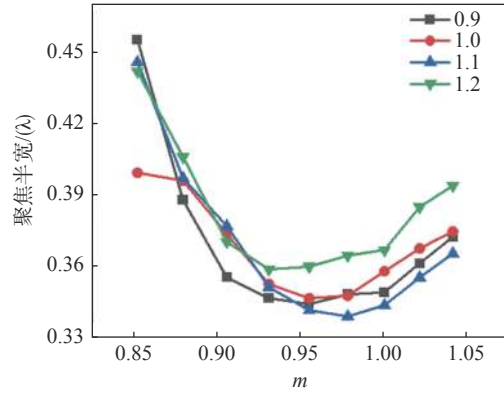


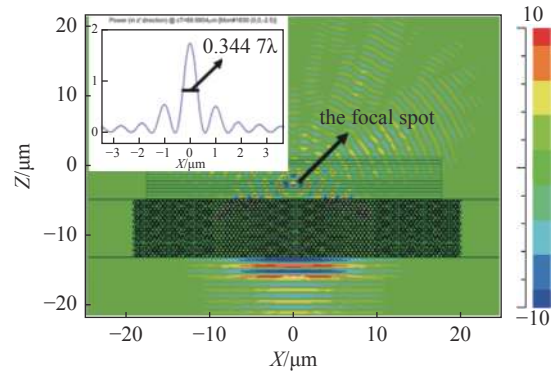
图 5 4 种 b 值的光子晶体在不同焦距下的聚焦半宽
Fig. 5 For the four structure of PCs, the relationship between the focal length and the half-width

2.4 中心空气孔半径对聚焦效果的影响

考虑到中心一列空气孔的半径也会对聚焦效果有一些影响, 设计了 4 种结构的光子晶体 ($b=0.9$ 、 $b=1.0$ 、 $b=1.1$ 、 $b=1.2$), 统一设置焦距 $y=3.8332 \mu\text{m}$ 。改变光子晶体的中心列空气孔半径 $r' = mr$ (m 在 $0.8521 \sim 1.0409$ 范围内变化) 进行模拟光路。中心列空气孔半径与聚焦半宽的关系如图 6(a) 所示。图中 4 种结构的光子晶体的焦斑半宽随中心空气孔结构的变化趋势基本相同, 均在 $m=0.95$ 附近取得最佳半宽。综合多个因素的聚焦效果, $b=0.9$ 的光子晶体结构在 $m=0.9549$ 时取得最小半宽。综合以上数据, 设计的梯度折射率光子晶体的参数如下: 在光程差公式 $n_x = (n_0 h + y - \sqrt{x^2 + y^2})/h$ 中, $h=9.64 \mu\text{m}$, $y=3.8332 \mu\text{m}$, $m=0.9549$ ($m = -0.21 n_0^2 - 0.85 n_0 + 0.36$), 修正后的折射率 $n_x' = n_x - 0.9 \sqrt{x}/h$ 。此时的仿真光路传播图及聚焦半宽如图 6(b) 所示, 对应的焦斑半宽值为 0.3447λ , 焦距 $y=1.45 \lambda$ 。



(a) 4 种 b 值的光子晶体在不同中心折射率下的聚焦半宽



(b) 最佳结构的梯度折射率光子晶体的光线传播图和聚焦光斑的半宽图结构

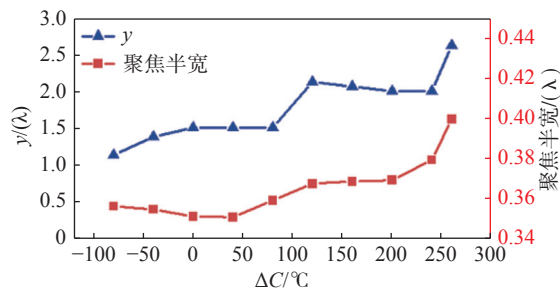
图 6 4 种结构的梯度折射率光子晶体的聚焦效果

Fig. 6 The results of the focal spot of the four gradient index PC structures

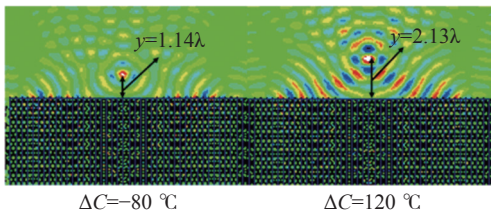
2.5 基于光子晶体结构设计的变焦系统

随着半宽越来越窄, 焦深也越来越窄, 这使得对焦比较困难。基于以上的光子晶体的结构, 设计了一个变焦系统。通过温度控制, 可以更好地对焦距进行调节, 使得该光子晶体在实际应用中更加方便。由于光子晶体是由硅材料和空气构成, 而硅材料具有热光效应^[18]。在光子晶体工作温度范围 ($0 \sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$) 内, 温度变化量与介质折射率的变化量之间的关系为: $\Delta n = \alpha_1 n \Delta T$ 。其中 α_1 为介质的热光系数, (硅的热光系数 $\alpha_1 = 1.86 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$), Δn 为介质折射率的变化量, ΔT 为温度变化量。通过半导体制冷片改变光子晶体的温度。在图 3(a) 中, 中心一列温度为 C_0 , 边缘一列温度为 C_1 , 设置每一列的温度相同, 温度由中心向边缘渐变, 温度差 $\Delta C = C_1 - C_0$ 。当 ΔC 在 $-120 \sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化时, 温差与焦

距、半宽的关系如图 7(a) 所示。图中随着 ΔC 值的增大, 聚焦光斑的焦距整体呈上升趋势, 焦距 y 在 $1.1374\lambda \sim 2.6264\lambda$ 范围内变化, 同时聚焦光斑的半宽都小于 0.4λ 。图 7(b) 为 $\Delta C = -80\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 的光线传播图, 半宽均小于 0.37λ 。因此所设计的焦距可调谐梯度折射率光子晶体, 在具有较大的调焦范围的同时, 也具备较好的聚焦效果。



(a) 调焦系统中温度与焦距和半宽的关系



(b) $\Delta C = -80\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $\Delta C = 120\text{ }^\circ\text{C}$ 的调焦系统的光路传播图

图 7 温度与焦距和半宽的关系及光路传播图

Fig. 7 The focal length and half-width of PCs at different temperatures and the optical path propagation diagram

3 结 论

通过调整梯度折射率光子晶体中空气孔的结构大小, 设计了一个由圆形空气孔构成的梯度折射率光子晶体结构。通过调整光子晶体中折射率的分布, 优化了聚焦效果。最终得出当修正系数在 0.9 左右, 中心空气孔半径为 $0.95r$ 时, 焦斑的半宽值最佳可达到 0.3447λ , 焦距为 1.45λ 。为了便于使用, 对梯度折射率光子晶体透镜的焦距调谐进行了研究, 设计了一个动态亚波长的调焦系统。通过改变光子晶体的温度, 获得了 $1.1374\lambda \sim 2.6264\lambda$ 的焦点调谐范围, 同时焦斑半宽均小于 0.4λ 。从而解决了随着焦点半宽越来越窄, 焦深也越来越小带来的调焦困难的问题。该新型聚焦结构, 适合应用在纳米光刻领

域, 因其较好的亚波长聚焦特性和自动调节焦距的功能, 使得微器件高度集成, 结构更加紧密, 降低了加工成本, 使得微型仪器成为可能。虽然国内目前因为实验室条件的限制, 光子晶体的制备较为困难, 但由于光子晶体在光通讯领域具有深远的影响, 研究亚微米光子晶体仍然具有重大的意义。

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] KESLER M P, MALONEY J G, SHIRLEY B L, et al. Antenna design with the use of photonic band-gap materials as all-dielectric planar reflectors[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, 11(4): 169 – 174.
- [4] LUO C Y, JOHNSON S G, JOANNOPOULOS J D, et al. All-angle negative refraction without negative effective index[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(20): 201104(R).
- [5] 王国旭, 梁斌明. 基于亚波长光栅的负折射光子晶体成像研究 [J]. *光学仪器*, 2021, 43(1): 63 – 68.
- [6] 蒋杰世, 杨康文. 基于光子晶体光纤参量振荡器的 CARS 成像光源研究 [J]. *光学仪器*, 2018, 40(5): 55 – 59.
- [7] LIANG W Y, CHEN J F, LI Z Y. Electrically controlled beam steering with wide deflection angles in liquid crystal photonic crystals[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(7): 075106.
- [8] LIU J X, RU G Z, JIANG X Y. Beam propagation in the photonic crystal of the local super-collimation regions[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32823 – 32834.
- [9] JIANG X Y, LI W, ZHANG X G, et al. Ultrahigh-resolution photonic-crystal superprism and method for designing the same: US, 10274642B2[P]. 2019-04-30.
- [10] CHEN J F, LIANG W Y, LI Z Y. Strong coupling of topological edge states enabling group-dispersionless slow light in magneto-optical photonic crystals[J]. *Physical Review B*, 2019, 99(1): 014103.

- [11] CENTENO E, CASSAGNE D. Graded photonic crystals[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(17): 2278 – 2280.
- [12] SINGH B K, BAMBOLE V, TIWARI S, et al. Photonic band gap consequences in one-dimensional exponential graded index photonic crystals[J]. *Optik*, 2021, 240: 166854.
- [13] ZHU Z C, LIU B, ZHANG F, et al. Improved light output from thick β -Ga₂O₃ scintillation crystals via graded-refractive-index photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 18646 – 18653.
- [14] LI Y H, FU Y Q, MININ O V, et al. Ultra-sharp nanofocusing of graded index photonic crystal-based lenses perforated with optimized single defect[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(8): 2628 – 2636.
- [15] 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.
- [16] GOOCH J W. Snell's law[M]//GOOCH J W. *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. New York: Springer, 2010.
- [17] LI Y J. Focal shifts in diffracted converging electromagnetic waves. I. Kirchhoff theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(1): 68 – 76.
- [18] WANG H S, WANG T B. Refractive index sensor utilizing thermo-optic effect of silicon waveguide[J]. *Optik*, 2016, 127(16): 6407 – 6411.

(编辑: 李晓莉)

(上接第 28 页)

- [16] KARIMI E, PICCIRILLO B, NAGALI E, et al. Efficient generation and sorting of orbital angular momentum eigenmodes of light by thermally tuned q -plates[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23): 231124.
- [17] DAVIDSON N, FRIESEM A A, HASMAN E. Holographic axilens: high resolution and long focal depth[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(7): 523 – 525.
- [18] MIKUŁA G, JAROSZEWICZ Z, KOŁODZIEJCZYK A, et al. Imaging with extended focal depth by means of lenses with radial and angular modulation[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9184 – 9193.
- [19] ZHANG Z R, WEN D D, ZHANG C M, et al. Multifunctional light sword metasurface lens[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1794 – 1799.
- [20] ZANG X F, XU W W, GU M, et al. Polarization-insensitive metalens with extended focal depth and longitudinal high-tolerance imaging[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(2): 1901342.
- [21] ZANG X F, DING H Z, INTARAVANNE Y, et al. A multi-foci metalens with polarization-rotated focal points[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(12): 1900182.

(编辑: 张 磊)