

## Sun-flower 型渐变光子晶体自聚焦透镜

刘 薇, 孙晓红, 王 帅, 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:** 大多数渐变光子晶体渐变透镜都是以正方晶格或三角晶格排布为基础, 并且多选择硅或二氧化硅等高折射率材料, 研究的波段多为红外波段。随着可见光通信技术的发展, 在可见光波段研究低折射率材料的自聚焦透镜变得很有意义。为了迎合这种需求, 提出了 Sun-flower 型渐变光子晶体自聚焦透镜。首先, 通过比较 TE 和 TM 两种偏振模式 Sun-flower 渐变光子晶体朗伯透镜在可见光波段的会聚强度, 发现 TM 型的会聚效果远远优于 TE 型。然后, 以 TM 型 Sun-flower 渐变光子晶体为基础设计圆柱形自聚焦平板透镜, 通过光场传输的模拟计算给出平板透镜在可见光波段自聚焦的拍长, 进一步优化平板透镜会聚光强设计透镜的层数, 结果表明在层数为 22 时效果最佳。最后, 讨论了列数的减少对平板透镜的影响, 结果表明随着列数的减少光强减弱。这对于制作出高性能会聚效果、短焦距、小体积的光学集成器件有重要的指导意义。

**关键词:** 自聚焦透镜; Sun-flower; 渐变光子晶体; 朗伯透镜; 平板透镜

**中图分类号:** O437.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1120002

## Self-focusing lens in Sun-flower graded photonic crystal

Liu Wei, Sun Xiaohong, Wang Shuai, Qi Yongle

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

**Abstract:** Most photonic crystal lens based on square or triangular lattice usually uses high refractive index materials such as Si or SiO<sub>2</sub>. And the study on such lens has been focused on the infrared wavelength range. With the development of the visible light communication technology, the research of Sun-flower self-focusing lens with low refractive index materials in visible band becomes very meaningful. To meet that requirements, self-focusing lens based on Sun-flower shaped graded PC was proposed. Firstly, by comparing the convergence intensity of this proposed lens between TE-polarized and TM-polarized mode, the convergence effect of TM polarization was superior to the convergence effect of TE polarization. Then self-focusing flat lens based on TM mode Sun-flower graded PC was designed. The beat length of the flat lens was given by the simulation of optical field transmission. The layers of the flat lens were optimized, and the best number of the layers was 22. In the end, the influence of the number of columns was discussed. The results show that the intensity decreases as the number of

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(11104251); 河南省基础研究项目(152300410023)

作者简介: 刘薇(1987-), 女, 博士生, 主要从事光子晶体光通信器件方面的研究。Email: L2008wei@163.com

通讯作者: 孙晓红(1971-), 女, 教授, 博士, 主要从事周期与准周期光子晶体超性能材料, 新型光传感, 以及新型全光通信网关键器件方面的研究。Email: iexhsun@zzu.edu.cn

columns reduces. It has great guiding significance to make optical integrated devices with high – performance convergence effect, short focal length and small volume.

**Key words:** self-focusing lens; Sun-flower; graded photonic crystals; luneburg lens; flat lens

## 0 引言

众所周知,光子晶体广泛应用于各种微腔、波导、滤波器、激光器等的设计<sup>[1-3]</sup>。折射率是光子晶体光学器件中的重要性能参数。潘继环等人为设计高品质的光学滤波器件,利用传输矩阵法,研究了垒、阱层介质折射率对光量子阱滤波带宽调制机制,其研究表明,光量子阱滤波带宽对垒、阱层介质折射率的响应灵敏<sup>[4]</sup>。李文胜等人研究了一维含负材料塔姆态的偏振特征<sup>[5]</sup>。袁卫等人也提出了折射率对光子晶体禁带的影响<sup>[6]</sup>。近几年,折射率渐变结构引起了广泛的兴趣。渐变材料<sup>[7]</sup>由空间不同单位细胞组成,可以实现各种梯度折射率 (gradient refractive index-GRI) 控制电磁场。对比正常均匀材料中光沿直线传播路径,渐变材料光学器件是指光在光学领域沿曲线传播<sup>[8]</sup>。与此同时,自聚焦效应也是近几年研究的热门,王驰等人提出了测量自聚焦光纤透镜聚焦常数的曲线拟合算法<sup>[9]</sup>。折射率渐变结构使光子晶体可以实现自聚焦效应。与传统的周期性以及准周期性光子晶体相比较<sup>[10-11]</sup>,Sun-flower 为六倍旋转对称性非周期结构。介质柱围绕中心圆点分布。由于它在波向量空间的高度对称性,所以可以提供各向同性光学特性<sup>[12]</sup>。这些特性有利于设计和制造具有会聚效果的设备 (例如朗伯透镜)。此项工作主要研究 Sun-flower 型渐变朗伯透镜和 Sun-flower 型渐变平板透镜。分别计算设计出 TE 偏振与 TM 偏振的朗伯透镜,利用软件模拟计算比较 TE 偏振和 TM 偏振的朗伯透镜在可见光波段的会聚效果。对于两种透镜,选择会聚效果较好的,以此为基础设计平板透镜,通过对比不同层数平板透镜的会聚光强来优化平板透镜。并且理论分析减少列数对会聚效果的影响。为制作出高性能会聚效果、短焦距、小体积的光学集成器件提供理论依据。

## 1 Sun-flower 型朗伯透镜的设计

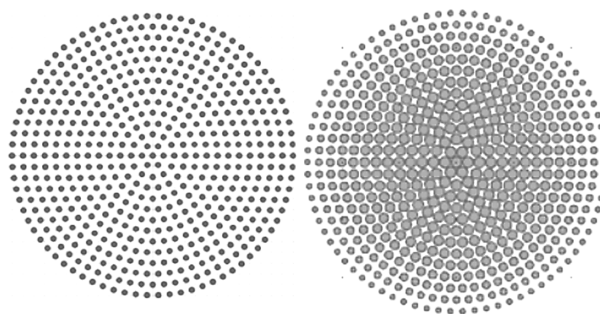
### 1.1 基本结构

Sun-flower 结构是一种新型的六重旋转对称准

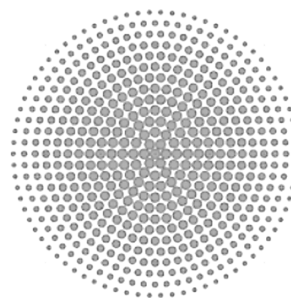
晶光子晶体结构,结构如图 1 所示,其结构分布满足:

$$x = aN \cos\left(\frac{2n\pi}{MN}\right), y = aN \sin\left(\frac{2n\pi}{MN}\right), n = 1 \sim MN$$

式中: $a$  为晶格常数; $N$  为介质柱所在的环数; $M$  为第一圈的介质柱的数量。如果固定介质柱的半径  $r$ , 那么介质柱的填充因子可以表示为  $f = m\pi r^2/S$ ,  $S$  为光子晶体结构的区域面积,  $m=0.5$ 。



(a) 完整的 Sun-flower 结构图 (b) TE 型 Sun-flower 渐变透镜  
(a) Complete Sun-flower structure (b) TE mode Sun-flower graded lens



(c) TM 型 Sun-flower 渐变透镜  
(c) TM mode Sun-flower graded lens

图 1 Sun-flower 透镜模型

Fig.1 Sun-flower lens model

朗伯透镜是球对称透镜,因而它能很好地应用于接收器和天线设备。朗伯透镜是一种从球心向外折射率渐变的结构,折射率分布为:

$$n = n_0 \sqrt{2 - (\rho/R)^2} \quad (1)$$

依据参考文献 [13],文中对渐变光子晶体 Sun-flower 朗伯透镜进行了设计<sup>[13]</sup>。式中, $n_0$  为背景折射率, $n$  为距离球心半径为  $\rho$  处的折射率, $R$  为透镜

的半径。设置晶格常数  $a=0.2 \mu\text{m}$ ,  $R=14a=2.8 \mu\text{m}$ , 背景折射率  $n_0$  为 1, Sun-flower 型朗伯透镜的折射率为  $n_{\min}=1$  到  $n_{\max}=1.41$ , 透镜材料的折射率为 1.55, 由公式(1)可知,  $n$  的大小依赖于介质柱的坐标。

由麦克斯韦有效介质理论可得, 介质柱的有效介电常数为:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_{\text{plane}} = \varepsilon_{\text{host}} + \frac{f\varepsilon_{\text{host}}(\varepsilon_{\text{rods}} - \varepsilon_{\text{host}})}{\varepsilon_{\text{host}} + L_{\text{plane}}(1-f)(\varepsilon_{\text{rods}} - \varepsilon_{\text{host}})} \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = (1-f)\varepsilon_{\text{host}} + f\varepsilon_{\text{rods}} \quad (3)$$

式中:  $f$  为介质柱的填充比,  $f = r^2\pi/a^2$ ,  $L_{\text{plane}} = 1/2$  是介质柱在  $xy$  平面内长波长限制情况下的去极化因子;  $\varepsilon_{\text{host}}$  为背景的介电常数;  $\varepsilon_{\text{rods}}$  为介质柱的介电常数; Sun-flower 结构的有效折射率为  $n_{te} = \sqrt{\varepsilon_{\text{plane}}}$  和  $n_{tm} = \sqrt{\varepsilon_z}$ 。

对于 TE 偏振,  $r_{te}$  可由公式(2)得到:

$$r_{te} = a \sqrt{\frac{(\varepsilon_{\text{host}} - n^2)(\varepsilon_{\text{host}} + \varepsilon_{\text{rod}})}{\pi(\varepsilon_{\text{host}} + n^2)(\varepsilon_{\text{host}} - \varepsilon_{\text{rod}})}} \quad (4)$$

式中:  $a$  为晶格常数,  $r_{tm}$  可由公式(3)得到:

$$r_{tm} = a \sqrt{\frac{n^2 - \varepsilon_{\text{host}}}{\pi(\varepsilon_{\text{rod}} - \varepsilon_{\text{host}})}} \quad (5)$$

所设计的 TE 和 TM 偏振透镜结构如图 1(b) 和(c)所示。

### 1.2 光场及强度分析

电磁场分布和强度计算采用有限元法<sup>[14]</sup>。这种朗伯透镜是球对称透镜, 所以平行光可以从任何方向入射电磁场并且在另一侧聚焦。模拟是在  $xy$  平面上完成的。沿着轴位置的电磁场强度进行了分析。图 2(a)~(d)的分别为 TE 和 TM 两种模式下, 波长为 750 nm 的光场分布图以及光强分布图。

平面波从下向上入射, 在上侧会聚。从图 2 的强度显示条及图 3 的数据可以看出, TM 透镜的会聚强度是 TE 透镜的  $10^5$  倍。由此可以证明 TM 透镜有更高的会聚效率。

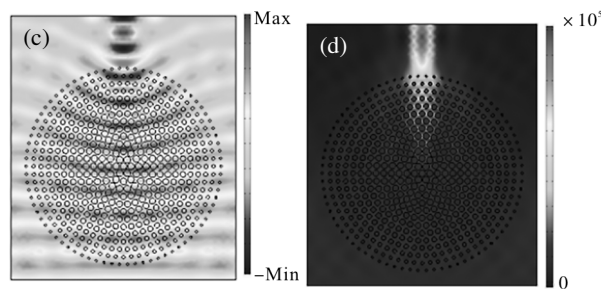
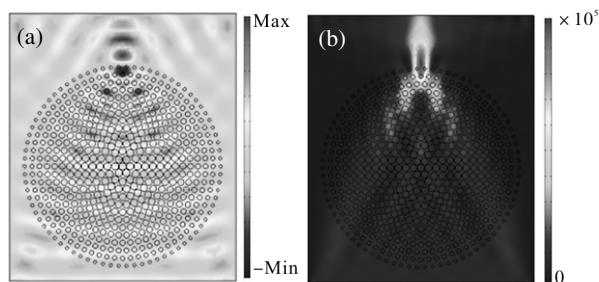


图 2 (a)TE 透镜在波长 750 nm 下的光场图; (b)TE 透镜在波长 750 nm 下的光强图; (c) TM 透镜在波长 750 nm 下的光场图; (d)TM 透镜在波长 750 nm 下的光强图

Fig.2 (a) Distribution of  $E_y$  field for TE lens; (b) Distribution of the time-averaged power flow for TE lens; (c) Distribution of  $H_y$  field for TM lens; (d) Distribution of the time-average power flow for TM lens. In all cases the wavelength is 750 nm

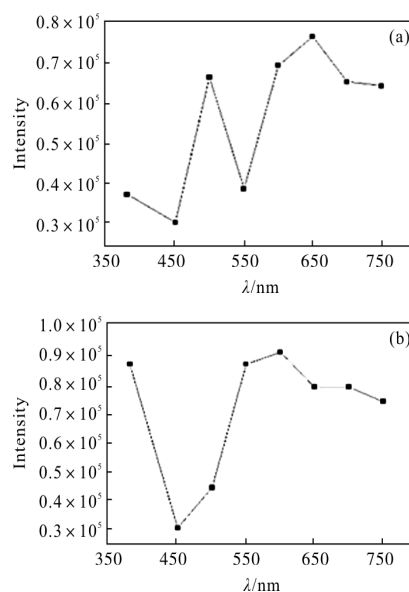


图 3 可见光波段不同波长对应的强度值 (a)TE 透镜 (b)TM 透镜

Fig.3 Intensity in visible waveband for the structures

(a) TE lens (b) TM lens with different wavelength

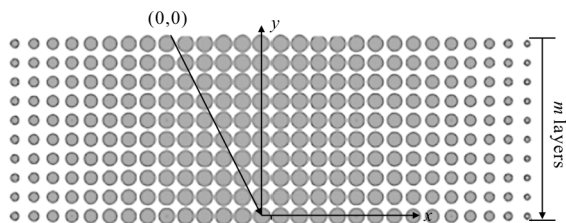
## 2 基于 Sun-flower 结构的平板型渐变透镜的设计与计算

以上理论分析及模拟计算结果表明 TM 透镜的透射以及聚焦性质要优于 TE 透镜。用同样的方法, 设计 TM 平板渐变透镜。与上面设计不同, 平板透镜只沿着  $x$  方向渐变<sup>[15]</sup>, 沿  $x$  轴方向对应的介质柱的半径如表 1 所示, 在  $y$  方向上保持不变, 如图 4(a)所示的平板透镜, 若以  $y$  为对称轴旋转一周, 则其  $xz$  面的

切面图如图 4(b)所示,可以看出仍然是 Sun-flower 型结构。

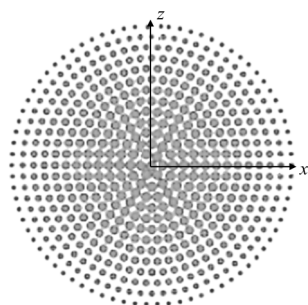
表 1 介质柱坐标与所对应的半径  
Tab.1 Coordinates of the cylinder and corresponding radius

No.	Coordinate $x/\mu\text{m}$	Radius $r/\mu\text{m}$
0	0	0.088 74
1	0.2	0.088 515
2	0.4	0.087 831
3	0.6	0.086 68
4	0.8	0.085 042
5	1	0.082 889
6	1.2	0.080 178
7	1.4	0.076 852
8	1.6	0.072 826
9	1.8	0.067 975
10	2	0.062 11
11	2.2	0.054 893
12	2.4	0.045 709
13	2.6	0.032 937
14	2.8	0



(a) Sun-flower 渐变平板透镜示意图

(a) Sun-flower graded flat lens



(b) 沿 y 轴旋转一周的 xz 的切面图

(b) xz plane along the y axis rotation

图 4 Sun-flower 渐变平板透镜示意图

Fig.4 Sun-flower graded flat lens

根据自聚焦透镜的一些重要性能参数,计算出四分之一拍长( $P$ )。

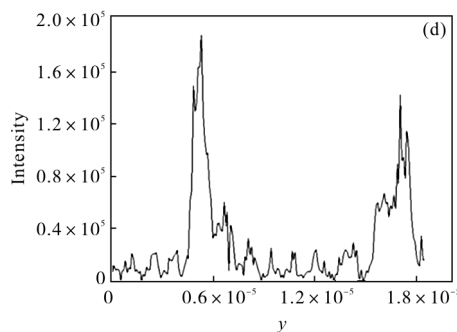
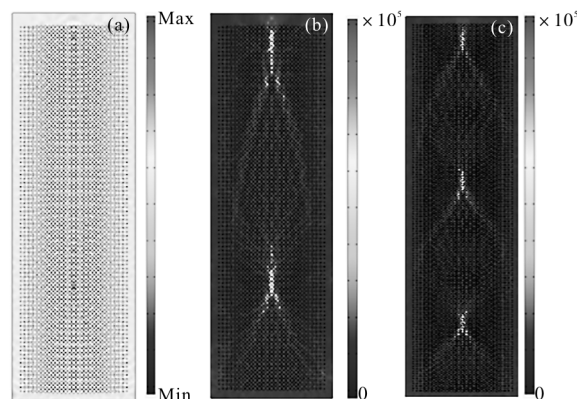
聚焦参数: $A=2\Delta/R^2$

节距: $P=2\pi/\sqrt{A}$

其中  $\Delta = \frac{n^2 - n_0^2}{2n}$ , 将之前设定的  $n=1.55, n_0=1$ ,

$R=2.8 \mu\text{m}$  代入可求得  $\frac{P}{4}=5.77 \mu\text{m}$ 。

图 5(d)显示第一个汇聚点的纵坐标为  $0.525 \mu\text{m}$ , 第二个会聚点的纵坐标为  $16.99 \mu\text{m}$ , 第二个会聚点与第一个会聚点应该相差半个  $P$  长, 由此得出模拟计算的  $P/4$  长为  $(16.99-5.25)/2=5.87 \mu\text{m}$ 。图 5(e)显示第一个会聚点的纵坐标为  $5.62 \mu\text{m}$ , 第三个会聚点的纵坐标为  $28.38 \mu\text{m}$ , 第二个会聚点与第一个会聚点应该相差一个  $P$  长, 由此得出模拟计算的  $P/4$  长为  $(28.38-5.62)/4=5.69 \mu\text{m}$ (注:由于层数的增多,所以将计算精度调大)。模拟计算结果与理论计算结果几乎相等。以此证明软件的可靠性。由上图分析比较可知,第二个和第三个会聚点要弱于第一个会聚点,所以在应用中主要研究运用第一个会聚点。在此基础上,进行层数的优化。



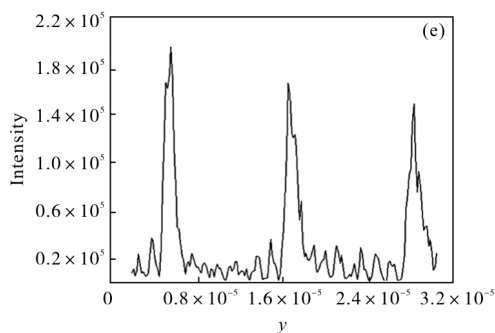


图 5 (a) 90 层平板透镜在波长 380 nm 下的光场分布图;  
 (b) 90 层平板透镜在波长 380 nm 下的光强分布图;  
 (c) 150 层平板透镜在波长 380 nm 下的光强分布图;  
 (d) 90 层平板透镜在会聚点所在垂线的强度值;  
 (e) 150 层平板透镜在会聚点所在垂线的强度值

Fig.5 (a) Light field distribution of 90 layers flat lens in 380 nm wavelength; (b) Light intensity distribution of 90 layers flat lens in 380 nm wavelength; (c) Light intensity distribution of 150 layers flat lens in 380 nm wavelength; (d) Intensity value along the vertical convergence point of 90 layers flat lens; (e) Intensity value along the vertical convergence point of 150 layers flat lens

图 5(d)显示第一个汇聚点的纵坐标为  $0.525 \mu\text{m}$ , 第二个会聚点的纵坐标为  $16.99 \mu\text{m}$ , 第二个会聚点与第一个会聚点应该相差半个  $P$  长, 由此得出模拟计算的  $P/4$  长为  $(16.99-5.25)/2=5.87 \mu\text{m}$ 。数据图 5(e) 显示第一个会聚点的纵坐标为  $5.62 \mu\text{m}$ , 第三个会聚点的纵坐标为  $28.38 \mu\text{m}$ , 第二个会聚点与第一个会聚点应该相差一个  $P$  长, 由此得出模拟计算的  $P/4$  长为  $(28.38-5.62)/4=5.69 \mu\text{m}$ (注: 由于层数的增多, 所以将计算精度调大)。模拟计算结果与理论计算结果几乎相等。以此证明软件的可靠性。由上图分析比较可知, 第二个和第三个会聚点要弱于第一个会聚点, 所以在应用中主要研究运用第一个会聚点。在此基础上, 进行层数的优化, 如图 6 所示。

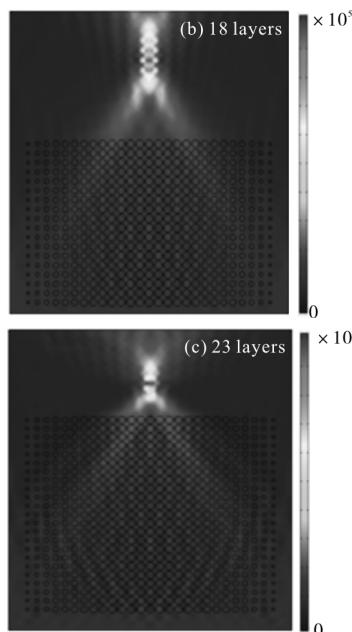
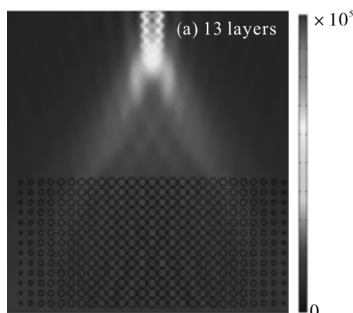


图 6 TM 透镜在波长 380 nm 下的光强分布图  
 Fig.6 Light intensity distribution of TM lens in 380 nm wavelength

如图 7 所示, 当层数为 22 的时候, 会聚强度达到最大。增加  $m$  的这些行为类似于在经典光学中增加常规透镜的中心厚度或减小曲率。从这些观点来看, 渐变光子晶体被认为是透镜。随着  $m$  从 13 增加到 22, 焦点处的强度增加。然而, 随着  $m$  从 22 增加到 28, 焦点处的强度减小。因为随着层数的增加会导致衍射光变密, 较高的衍射光将会导致焦点处强度的减小。因此, 当  $m$  从 13 增加到 28 时, 焦点处的强度不总是增加。当  $m$  为 22 时发现最大强度。

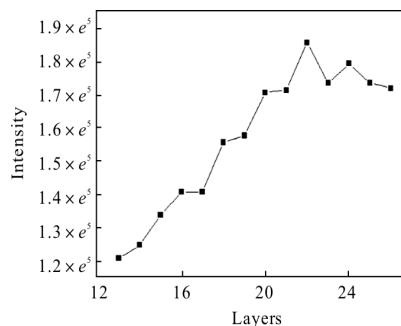


图 7 不同层数平板透镜对应的会聚强度比较

Fig.7 Intensity at focus for the flat lens with different layers

根据以上结果, 针对波长 380 nm, 层数为 22 时, 减少列数, 进行对比, 光强图如图 8 所示。当列数减少时, 可以观察到焦深增加。这类似于经典光学中的现象。所以光斑的强度会减弱, 这和得到的数据相吻合,

如图 9 所示,随着列数的减少,会聚强度逐渐减弱。

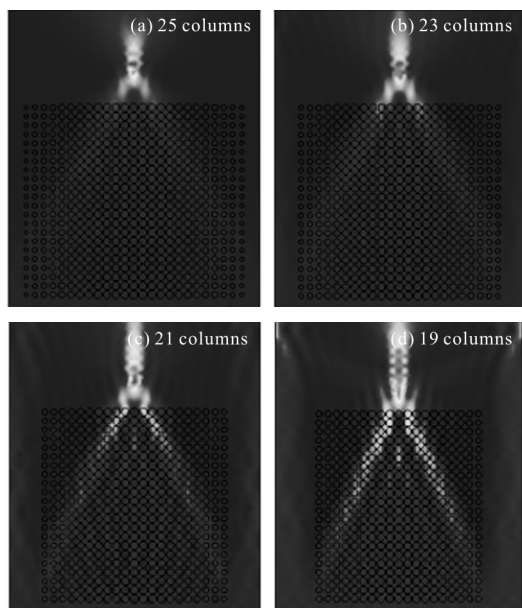


图 8 TM 透镜在波长 380 nm 下的光强分布图

Fig.8 Light intensity distribution of TM lens in 380 nm wavelength

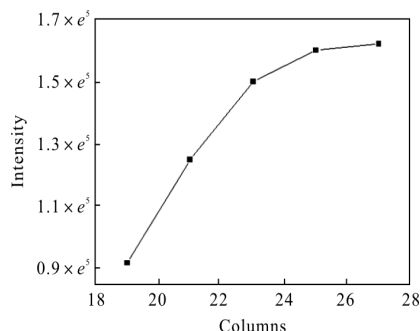


图 9 不同列数平板透镜对应的会聚强度比较

Fig.9 Intensity at focus for the flat lens with different columns

### 3 结论

文中设计了以 Sun-flower 结构为基础的朗伯透镜,利用有限元法模拟计算了 Sun-flower 型朗伯透镜以在可见光波段的聚焦效果。结果表明 TM 透镜的会聚效果要优于 TE 透镜的会聚效果。TM 透镜的会聚强度是 TE 透镜的  $10^5$  倍。所以在此基础上,设计了以 Sun-flower 结构为基础的 TM 平板透镜,然后理论计算出光线在 Sun-flower 型 TM 平板透镜中传播的拍长,与模拟计算了拍长进行比较,结果显示模拟计算结果与理论计算结果相吻合,由此推断软件模拟的可靠性尚佳。以此为基础进行了不同平板层数得到会聚强度的比较,

得出在平板层数为 22 时,会聚效果是最优的。最后又讨论了缩减列数对会聚效果的影响,得出随着列数的减少,会聚强度逐渐减弱。这对于制作出高性能会聚效果、短焦距、小体积的光学集成器件有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Lee P T, Lu T W, Fan J H, et al. High quality factor microcavity lasers realized by circular photonic crystal with isotropic photonic band gap effect [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(15): 151125.
- [2] Zhang X, Sun X, Tang H X. A 1.16- $\mu$ m-radius disk cavity in a sunflower-type circular photonic crystal with ultrahigh quality factor [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3195-3197.
- [3] Bhattacharjee J, Siraji A A, Alain M S. Phase modulated circles in a sunflower-type circular photonic crystal with ultra-small mode area and high-Q cavity[C]// *Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), 2014 International Conference on IEEE*, 2014: 6919038.
- [4] Pan Jihuan, Su An, Meng Chengju. Modulation of medium refractive index on filter performance of photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 833-837. (in Chinese)
- [5] Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, et al. Polarization properties of Tamm state of one-dimensional photonic crystal containing single-negative materials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1600-1604. (in Chinese)
- [6] Yuan Wei, Zhang Jianqi, Qin Yuwei, et al. Near-infrared spectral region photonic crystal band gaps and KTP defect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0104005. (in Chinese)
- [7] Smith D R, Mock J J, Starr A F, et al. Gradient index metamaterials[J]. *Phys Rev E*, 2005, 71(3Pt2B): 036609.
- [8] Howard J W, Ryan-Howard D P. Optical design of thermal imaging systems utilizing gradient-index optical materials [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(2): 242263.
- [9] Wang Chi, Xu Tingting, Bi Shubo, et al. Curve-fitting algorithm of measuring focusing constant of gradient-index fiber lens [J]. *Optics and Precision Engineering*,

- 2015, 23(12): 3309–3315. (in Chinese)
- [10] Wu Q, Gibbons J M, Park W. Graded negative index lens by photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16941–16949.
- [11] Centeno E, Cassagne D. Graded photonic crystals [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(17): 2278–2280.
- [12] Xiao S, Qiu M. Study of transmission properties for waveguide bends by use of a circular photonic crystal [J]. *Physics Letters A*, 2005, 340(5): 474–479.
- [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(6): 367–373.
- [14] Hrennikoff A. Solution of problems of elasticity by the framework method [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1941, 8(4): 169–175.
- [15] Liu W, Sun X, Gao M, et al. Luneburg and flat lens based on graded photonic crystal [J]. *Optics Communications*, 2016, 364(4): 225–232.