

文章编号: 0253-2239(2010)08-2427-05

三维梯度光子晶体聚焦透镜

陈素娟 周崇喜 邱传凯 罗先刚

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 提出了一种利用不同大小的高折射率介质方柱组成的梯度光子晶体来实现聚焦的方法。数值仿真计算证明,该聚焦器件能实现高能量利用率和接近衍射极限的聚焦光斑。在透镜两侧涂上一层增透膜,可以有效地抑制旁瓣和提高能量利用率。随着透镜填充因子的增大,焦点的能量随之增强。针对波长 $10.6\ \mu\text{m}$,设计了一个口径为 $100\ \mu\text{m}$,焦距为 $50\ \mu\text{m}$ 的梯度光子晶体结构透镜,利用时域有限差分方法得出透镜能量利用率在填充因子为 44.7% 时达到了 48.5% ,焦斑大小也接近衍射极限。

关键词 光学器件;能量效率;时域有限差分;梯度光子晶体;薄膜;填充因子

中图分类号 O539 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2427

Focusing Lens by Three-Dimensional Graded Photonic Crystal

Chen Sujuan Zhou Chongxi Qiu Chuankai Luo Xiangang

(State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract A graded photonic crystal formed by the varying the high-refractive-index square dielectric rods is used as a structured lens to focus. This lens can realize high energy utilization and large numerical aperture. Otherwise, the energy utilization and the imaging quality can be greatly improved by adding thin dielectric films on the two sides of the lens, and the energy utilization increases as the fill factor increases. A lens with an aperture of $100\ \mu\text{m}$ and a focal length of $50\ \mu\text{m}$ is designed for the wavelength of $10.6\ \mu\text{m}$. The energy utilization reaches 48.5% in the case of filling factor as 44.7% by finite difference and time domain (FDTD) algorithm, and the spot size approaches to the diffraction limit.

Key words optical devices; energy utilization; finite difference and time domain; graded photonic crystal; thin films; filling factor

1 引 言

传统的衍射透镜,如菲涅耳衍射透镜,由于它们本身重量轻,结构紧凑^[1],被广泛应用在各种光学系统中,但是,对于这种透镜,最小特征尺寸随着数值孔径的增大而减小,存在最小特征尺寸的制作问题,所以并不能用于大的数值孔径和高分辨率系统中。为了解决这个问题,Kipp等^[2]提出了一种多孔透镜的光学器件,这种器件主要是用小孔来取代菲涅耳环,当小孔的尺寸和位置取得合适时,对焦点光强起积极作用,但是这种多孔透镜的能量利用效率

很低。最近,金属孔阵列的异常透过现象引起了人们的广泛重视^[3],基于这种异常增透效应,一种在金属薄膜上钻刻不同大小亚波长金属方孔的结构透镜被提了出来^[4],这种金属结构透镜通过调制方孔的宽度来调制相位延迟,从而达到聚焦成像的目的,它不仅具有重量轻,结构紧凑的优点,并且它克服了最小特征尺寸的限制。相比于多孔透镜,这种结构透镜的能量有所提高,但仍不太高,其主要原因是由于孔边长的变化范围大,导致出射波前不连续,使得二级衍射斑强度变大^[5],大大降低了能量效率和成像

收稿日期: 2009-09-16; 收到修改稿日期: 2009-10-13

基金项目: 国家 973 计划(2006CB302900)和中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室开放资助课题。

作者简介: 陈素娟(1984—),女,硕士研究生,主要从事亚波长结构透镜方面的研究。E-mail: dyyzcsj@163.com

导师简介: 周崇喜(1970—),男,博士,研究员,主要从事激光光束整形变换技术方面的研究。E-mail: cxzhou@ioe.ac.cn (通信联系人)(中国光学学会会员号: S040m620)

质量。近年来,光子晶体由于其具有吸引力的光学结构已经越来越受到关注。通过调整光子晶体的结构特点,制造相应的点缺陷或者线缺陷^[6,7],使得光子晶体已经成为光束控制的有力手段。运用光子晶体来分束^[8,9]、合束^[10]和滤波^[11]的相关模型已经被提出来了,甚至负折射率也能在光子晶体中实现^[12]。在光通信方面,运用光子晶体可以制作低损耗的弯曲波导^[13]。在光学器件方面,可以通过调制光子晶体中空气孔的大小,或者通过往相同大小空气孔中填充入不同折射率介质即梯度光子晶体来实现聚焦成像^[14~16]。光子晶体成像有能量效率高,质量轻便等特点,但是以上所述的调制都是局限于二维。

本文提出一种三维成像光子晶体器件,通过调制基底上不同大小高折射率介质方柱的排布来实现聚焦效果。这种光子晶体集成了上述各个透镜的优点,摒弃了它们的缺点,具有很好的可实现性。针对波长 $10.6 \mu\text{m}$, 选用材料锗,设计了一个口径为 $100 \mu\text{m}$, 焦距为 $50 \mu\text{m}$ 的透镜,通过时域有限差分(FDTD)仿真模拟得到了一个近似衍射极限的聚焦光斑。通过对透镜结构的优化,使得透镜的能量利用率大大提高。

2 模型与模拟结果

高折射率介质具有相对较好的束光性。对于单个高折射率介质柱如图 1, 将高折射率介质方柱看成一个法布里-珀罗(F-P)腔,为了实现良好的透射率,厚度应满足

$$\sqrt{\epsilon} h = \frac{1}{2} p \lambda_0, \quad (1)$$

式中 p 为 $1, 2, 3 \dots$ 的整数, h 为介质柱的高度, λ_0 是入射波长, ϵ 是高折射率介质的介电常数。

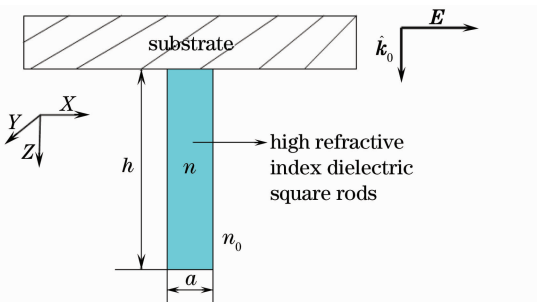


图 1 光子晶体结构透镜中的一根高折射率介质方柱的截面图

Fig. 1 Cross section of a square dielectric rod of high refractive index in the graded photonic crystal lens

图中边长为 a , 柱长为 h , 偏振光垂直基底入射, k_0 是入射波矢, n 为高折射率介质折射率, n_0 为空气折射率。

针对红外波长 $10.6 \mu\text{m}$ 设计梯度光子晶体透镜, 厚度为 $\lambda/2$, 即高折射率介质方柱的高度为 $5.3 \mu\text{m}$, 方柱的边长在 $0.13\lambda \sim 0.24\lambda$, 即 $1.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之间变化。根据二元光学菲涅耳带环设计原理有

$$\varphi(r) = 2m\pi + \frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{r^2 + f^2} - f), \quad (2)$$

式中 m 为任意整数, 使得 $\varphi(r)$ 处于 $0 \sim 2\pi$, m 取值的个数即菲涅耳带环数。对于口径为 $100 \mu\text{m}$, 焦距 $50 \mu\text{m}$ 的透镜, 需要设计两个完整波带环和一个不完整波带环, 每个波带环中的方柱从大到小均匀线性变化, 根据环带的宽度大小, 使得方柱大小在 $1.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 范围内依次抽样排列。方柱按旋转对称分布排列, 填充因子(高折射率介质方柱占透镜的面积比例)由每一个环上方形介质柱的数目决定, 在本文的参数透镜中, 第一个菲涅耳环带的宽度为 $32.6 \mu\text{m}$, 取每个单元环为 $3 \mu\text{m}$, 均匀变化高折射率介质柱大小为 $2.5 \sim 1.4 \mu\text{m}$, 每递减 $0.11 \mu\text{m}$ 取样。第二环带的宽度为 $13.4 \mu\text{m}$, 方柱大小每递减 $0.367 \mu\text{m}$ 取样。第三个环带宽度为 $10.4 \mu\text{m}$, 方柱大小依次递减 $0.55 \mu\text{m}$ 。透镜结构示意图如图 2 所示。透镜表面平行 XY 面, 光轴沿着 Z 轴方向, 入射波为 X 方向偏振的线性平面波。 X 偏振线性平面波垂直入射, 模型参数确定后, 用 FDTD 来实现数值模拟结果。

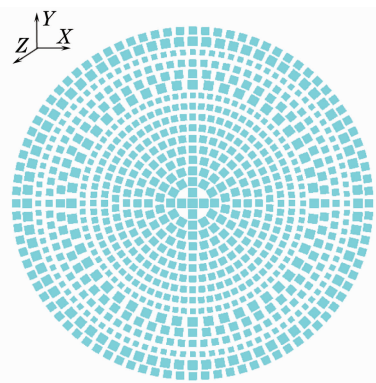


图 2 梯度光子晶体结构透镜的俯视图

Fig. 2 Planform illustration of the distribution of the graded photonic crystal lens

模拟结果如图 3 所示, 图 3(a) 清楚地显示了区域中有两个焦点, 这主要是由(2)式中 m 的值决定的。如果 m 有不同的值, 多余的焦点就会出现; m 只有一个值时, 多余的焦点就会消失, 但此时透镜结

构只有一个菲涅耳环带,也意味着这时的透镜数值孔径可能不会很大。可以看到透镜的主焦点在大约 $z=57.0 \mu\text{m}$ 处,而设计的焦点应在 $z=55.3 \mu\text{m}$ 处(焦距和透镜厚度的和),这个误差和 FDTD 数值模

拟计算的误差是一致的。另外,模拟得到焦斑的半峰全宽(FWHM)是 $7.2 \mu\text{m}$ 左右,理论的艾里斑半径应是 $6.5 \mu\text{m}$,可以看到焦斑的大小与衍射极限接近。

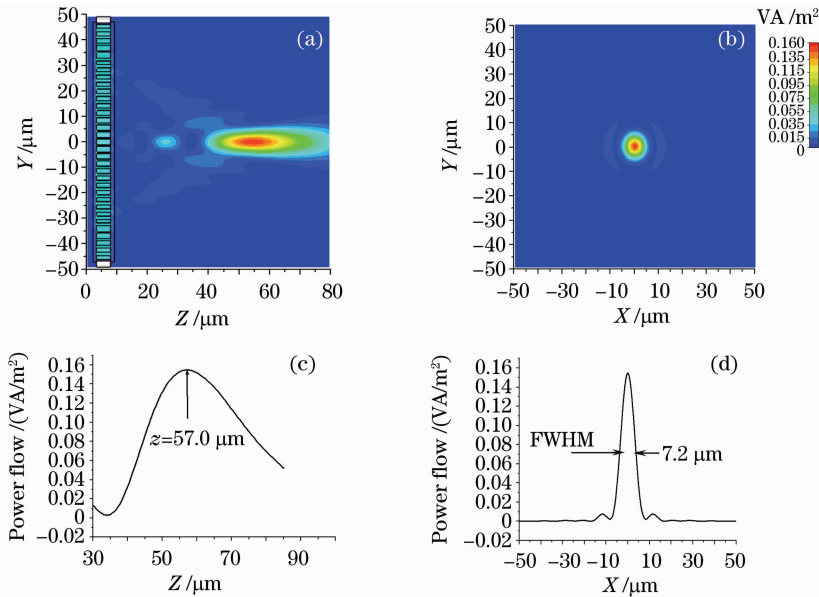


图 3 (a) $X=0$ 时, YZ 平面的数值计算的强度分布。(b) $Z=57.0 \mu\text{m}$ 时, XY 平面的强度分布。(c) Z 轴方向的强度分布, 显示焦点位置在 $Z=57.0 \mu\text{m}$ 。(d) (b) 中焦平面处 $X=0$ 时, 焦斑大小(FWHM 为 $7.2 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Numerical calculation. (a) Intensity distribution in $Y-Z$ plane. (b) Intensity distribution in $X-Y$ plane at $Z=57.0 \mu\text{m}$. (c) Intensity distribution along the Z -axis, indicating the focus position $Z=57.0 \mu\text{m}$. (d) Cross section of (b) at $X=0$, spot size (FWHM) is $7.2 \mu\text{m}$

透射率是通过整个入射面和出射面的平均能流来计算的,入射能流为 P_{in} ,出射能流为 P_{out} ,最终结果透射率为 $t=P_{\text{out}}/P_{\text{in}}\approx 97\%$ 。能量利用率在该模型中为 41.4% ,它是指焦斑的能量与入射面总能量的比值,下面将针对提高能量利用率提出透镜优化的方法。

配,对梯度光子晶体透镜的两面增加一层增透膜进行仿真模拟,可以看到,在相同口径和焦距条件下,加膜后的焦斑旁瓣很小如图 4 所示。

加膜后,透射率接近 81.7% ,但是能量利用率却只达到了 46.3% ,如图 5 所示,焦斑在焦平面上 $Y=0$ 处,加膜后的焦斑能量有所变大,且旁瓣变小,可以看出加膜后杂散光变少了。这个主要是不加膜时,很多光从入射面进去后经过空气介质部分直接出射,没有经过调制,形成杂散光。其次,由于

3 透镜的优化

3.1 加膜处理

考虑到高折射率介质和空气介质中的阻抗不匹

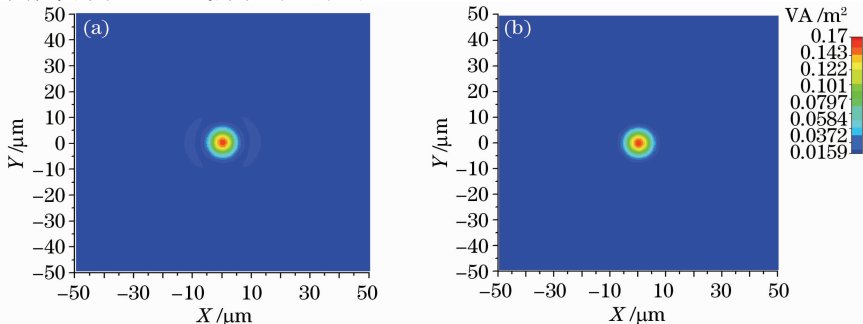


图 4 (a) 未加膜和(b)加膜梯度光子晶体结构透镜的焦斑图

Fig. 4 Intensity distribution at the focal plane, respectively. (a) The graded photonic crystal without a thin dielectric film; (b) the graded photonic crystal with a thin dielectric film

空气和高折射率介质界面处的阻抗不匹配,引起了散射和反射等杂散光,导致通过不同大小高折射率介质方柱的光导出的光分量不够大,所以尽管透射率大,但可被利用的光能量不够多,导致能量利用率不是很大。

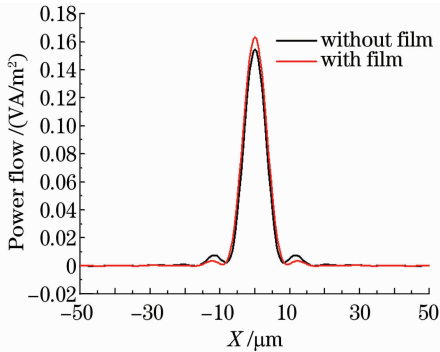


图5 在加膜和未加膜情况下,相同口径和焦距的透镜形成的焦斑在焦平面上 $Y=0$ 处,焦斑能量大小和尺寸大小的对比

Fig. 5 Intensity distributions of the focal plane along $Y=0$ for the lens with the same diameter and focal length with and without a thin dielectric film respectively

3.2 填充因子对能量利用率的影响

由于每个环上的高折射率介质方柱的数目可以用来调制填充因子,分别对具有不同填充因子但具有相同口径和焦距的梯度光子晶体结构透镜所形成的焦斑能量和大小来做对比,如图6所示。

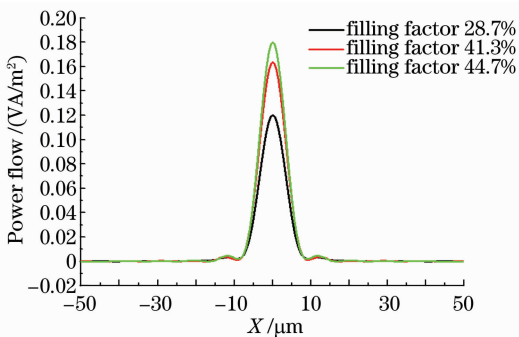


图6 加膜后,相同口径和焦距的透镜在不同填充因子情况下形成的焦斑在焦平面上 $Y=0$ 处焦斑能量大小和尺寸大小的对比

Fig. 6 Intensity distribution of the focal plane along $Y=0$ for the lens with the same diameter and focal length with different filling factors

由结果可以看出,当高折射率介质方柱的排列变密时,得到焦斑的能量也随之变强,当高折射率介质方柱的排列变疏时,焦斑的能量相对变弱。对于这一现象,可以从光波导这一角度解释,当高折射

率介质方柱的排列变密时,能起导光作用的波导数目变多,从而提高了衍射效率。由此可见适当提高填充因子可以提高衍射效率。但不能太过,首先,当两根高折射率介质柱的距离过小时,会给加工带来困难,其次,耦合太强,使得柱的导光能力下降,光能大部分通过空气缝导出,增加了杂散光。如表1所示,最终在填充因子为44.7%时,能量利用率达到了48.5%。

表1 不同填充因子的结构透镜对应的能量利用率

Table 1 Energy utilization of the structured lens with different filling factors

Filling factor /%	28.7	41.3	44.7
Energy utilization (η) /%	33.1	46.3	48.5

4 结 论

提出了一种新型的大数值孔径,高能量利用率的梯度光子晶体结构透镜。通过改变高折射率介质方柱周期阵列中的方柱的大小,得到了接近衍射极限的衍射焦斑。针对红外波段 $10.6 \mu\text{m}$ 波长,设计了口径为 $100 \mu\text{m}$,焦距为 $50 \mu\text{m}$ 的填充型结构透镜并进行了数值模拟,提出了两种优化方法:1)考虑到界面处阻抗不匹配,加入了介质薄膜这样一个缓冲层来减小界面处的能量损耗和杂散光的分布。2)通过控制填充因子来提高能量利用率。无论数值孔径为多少,最小方柱即最小特征尺寸大小为 $1.4 \mu\text{m}$,实验制作可使用电子束刻蚀工艺并最大程度控制其工艺精度,这也意味着不受特征尺寸限制的大数值孔径高能量利用率的梯度光子晶体结构透镜是实际应用中可以实现的。

参 考 文 献

- Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 4~16
金国藩,严瑛白,邬敏贤. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. 4~16
- L. Kipp, M. Skibowski, R. L. Johnson *et al.*. Shaper images by focusing soft X-ray with photon sieve [J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 184~188
- T. W. Ebbesen. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, **391** (6668): 667~669
- Yanzhong Chen, Chongxi Zhou, Xiangang Luo *et al.*. Structured lens formed by a 2D square hole array in a metallic film[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 753~755
- Shaoyun Yin, Chongxi Zhou, Xiangang Luo *et al.*. Imaging by a sub-wavelength metallic lens with large field of view [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2578~2583
- Meng Qingsheng, Ouyang Zhengbiao, Wang zhongchun *et al.*. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007,

- 27(7): 1290~1294
孟庆生, 欧阳征标, 王仲淳等. 一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1290~1294
- 7 Sun Qing, Liu Erming, Qin Fenghua *et al.*. All-fiber high-pressure gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1029~1034
孙青, 刘二明, 秦丰华等. 全光纤型空芯光子晶体光纤高压气体[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1029~1034
- 8 C. C. Chen, H. D. Chien, P. G. Luan. Photonic crystal beam splitters[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(33): 6187~6190
- 9 H. T. Chien, C. C. Chen, P. G. Luan. Photonic crystal beam splitters[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 873~875
- 10 J. M. Park, S. G. Lee, H. Y. Park *et al.*. Efficient beaming of self-collimated light from photonic crystals [J]. *Opt. Express*, **16**(25): 20354~20367
- 11 C. C. Chen, Y. L. Tsai, C. L. Hsu *et al.*. Propagation loss reduction of photonic crystal slab waveguides by microspheres [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**: 3934~3939
- 12 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Xia guiji narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1695~1699
张文富, 方强, 程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1695~1699
- 13 Bing Chen, Tiantong Tang, Hao Chen. Study on a compact flexible photonic crystal waveguide and its bends [J]. *Opt. Express*, **17**(7): 5033~5038
- 14 Hamza Kurt. Graded index photonic crystals [J]. *Opt. Express*, **15**(3): 1240~1253
- 15 Hung-Ta Chien, Chii-Chang Chen. Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10759~10764
- 16 Qi Wu, John M. Gibbons, Wounghang Park. Graded negative index lens by photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(21): 16941~16949