

## 大数值孔径介质结构透镜

陈素娟, 陈结祥, 徐明明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 提出了一种新型大数值孔径介质结构透镜, 能量利用率达到了 44%。通过数值仿真 FDTD 计算证明该聚焦器件能实现高的能量利用率和接近衍射极限的聚焦光斑, 且聚焦光斑的旁瓣很小。其次, 对该透镜的色散性能进行了研究, 发现该透镜具有与普通透镜相反的色散特性。故该透镜可以与普通透镜组合消色差。另外, 该透镜克服了最小特征尺寸, 实现了大数值孔径, 针对波长 10.6  $\mu\text{m}$  设计了相同口径、不同  $F$  数的介质结构透镜, 最小  $F$  数达到了 0.25。

**关键词:** 光学器件; 能量效率; FDTD; 色散;  $F$  数

**中图分类号:** O43    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0479-04

## Dielectric structured lens of large numerical aperture

Chen Sujuan, Chen Jiexiang, Xu Mingming

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A dielectric structured lens formed by varying the high-refractive-index square dielectric holes was proposed. This lens can realize higher energy efficiency compared with the high-refractive-index square dielectric metal structured lens. The energy efficiency has achieved 44% by finite difference and time domain (FDTD) algorithm, and the spot size leads to the diffraction limit. Second, the dispersion characteristic of the lens was researched, it has the counter dispersion characteristic with the geometrical optics lens, so lens group make up of those dielectric structured lens and the geometrical optics lens can be used to clear dispersion. In addition, it overcomes the limitation of feature size of the large numerical aperture (NA) lens, so the large NA lens can be achieved. Four lens with the same aperture but different focus length were designed for the wavelength 10.6  $\mu\text{m}$ . The smallest  $F$  number has reached 0.25.

**Key words:** optical devices; energy efficiency; FDTD; dispersion;  $F$  number

收稿日期: 2013-06-01; 修订日期: 2013-07-03

基金项目: 中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金

作者简介: 陈素娟(1984-), 女, 硕士, 主要从事光学设计方面的研究。Email: dyzcsj@163.com

## 0 引言

几何透镜由于面形变化连续,在实现大数值孔径时,其系统相对笨重,衍射透镜通过不连续微细面形变化来实现波前的调制,其一般都较轻便,结构特征也比较紧凑<sup>[1]</sup>,被广泛应用在各种光学系统中,但是,这种透镜同时存在缺陷,当数值孔径较大时,其面形变化对应的最小特征尺寸变小,在制作上难度变大。所以光学系统对大的数值孔径和高分辨率有应用局限性。在这一背景下,Kipp 等提出了一种多孔透镜的光学器件,多孔透镜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<sup>[2]</sup>,但是这种多孔透镜的能量利用率很低。为了提高能量利用率,陈艳中等提出了一种基于异常增透效应的金属结构透镜<sup>[3]</sup>,该透镜是在金属薄膜上钻刻不同大小亚波长金属方孔来实现聚焦成像<sup>[4]</sup>,通过调制方孔的宽度来调制位相延迟,从而达到调制波前的目的,该透镜具有质量轻、结构紧凑的优点,并且无论数值孔径多大,其中的位相调制方孔大小为一个固定范围值。与多孔透镜相比,这种结构透镜的能量有所提高,但离实际应用仍有很大的距离,其主要原因是空气孔边长大,不能精确地调制波前,致使二级衍射斑强度变大<sup>[5]</sup>,从而降低了能量利用率和成像质量。高折射率介质金属结构透镜是用高折射率介质孔代替空气孔,在得到相同的位相调制时,孔大小进一步缩小,波前调制也更为准确。该种高折射率介质金属结构透镜的能量利用率有较大的提高<sup>[6]</sup>。但其能量利用率仍然只有 25% 左右,并且加工较为困难。

在高折射率介质金属结构透镜的基础上,提出了一种高折射率介质填充型介质结构透镜,用折射率相对低的介质来代替金属膜,主要以折射率为 1 的空气介质进行模拟仿真。通过调制不同大小高折射率介质方孔的排布来实现聚焦效果。这种结构透镜在工艺上具有很好的可实现性,并且能量利用率大大提高。

文中设计了一个口径为 100 m、焦距为 50 m 的透镜,设计波长为 10.6 m,选用高折射率介质材料锗,通过电磁场仿真软件模拟得到了一个近似衍射极限的聚焦光斑。另外,研究了该透镜的色散特性,最后对该透镜在快透镜的实现上做了一个验证。

## 1 模型与模拟结果

高折射率介质由于相对较好的束光性被运用于

文中。对于单个高折射率介质孔如图 1 所示。将高折射率介质方孔看作一个介质波导,由于介质波导中出射模式非常复杂,出射位相较难计算出来,而该高折射率介质柱是在亚波长范围内,因此主要采用等效折射率粗算模型参数后再通过模拟仿真软件进行反馈优化。考虑到高折射率介质和空气介质中的阻抗不匹配,对结构透镜的两面增加一层增透膜进行仿真。模拟单个高折射率介质孔模型如图 1 所示。图中, $a$  为边长, $h$  为孔深,偏振光垂直基底入射。 $k_0$  为入射波矢, $n$  为高折射率介质折射率, $n^0$  为基底介质空气折射率。

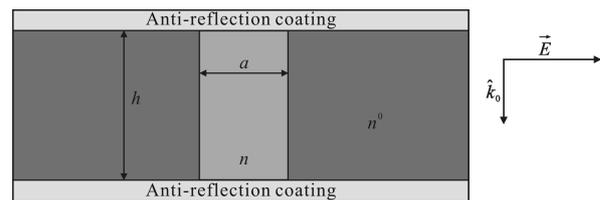


图 1 介质结构平板结构透镜中的一个高折射率介质方孔  
Fig.1 Cross section of one unit of dielectric structured plane lens

该高折射率介质结构透镜设计波长为  $10.6 \mu\text{m}$ ,厚度为  $1/2\lambda$ ,即高折射率介质方柱的高度为  $5.3 \mu\text{m}$ ,方柱的边长为  $0.24\lambda \sim 0.13\lambda$ ,即  $2.5 \sim 1.4 \mu\text{m}$  之间等分递减变化。根据二元光学菲涅耳带环设计原理设计:

$$\varphi(r) = 2m\pi + \frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{r^2 + f^2} - f) \quad (1)$$

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数。对于口径  $100 \mu\text{m}$ 、焦距  $50 \mu\text{m}$  的透镜,需要设计两个完整波带环,每个波带环中的方柱从大到小梯度变化,按旋转对称分布排列。在文中的结构透镜中,第一个菲涅耳带环的宽度为  $32.6 \mu\text{m}$ ,取每个单元环为  $3 \mu\text{m}$ 。透镜结构示意图如图 2 所示(浅灰部分为基底介质空气,深灰部分为高折射率介质方

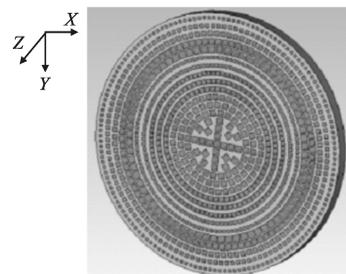


图 2 高折射率介质结构透镜俯视图  
Fig.2 Planform illustrates the distribution of square rod

孔)。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。

平行光入射,设置好电磁场边界条件后,电磁场数值仿真结果分布如图 3 所示。其中,图 3(a) 为  $X=0 \mu\text{m}$ ,  $YZ$  平面的强度分布;图 3 (b) 为  $Z=49.8 \mu\text{m}$ ,  $XY$  平面的强度分布;图 3(c) 为  $Z$  轴方向的强度分布,显示焦点位置在  $Z=49.8 \mu\text{m}$ ;图 3(d) 为 (b) 中焦平面处  $X=0$ , 焦斑大小为  $7.0 \mu\text{m}$ 。

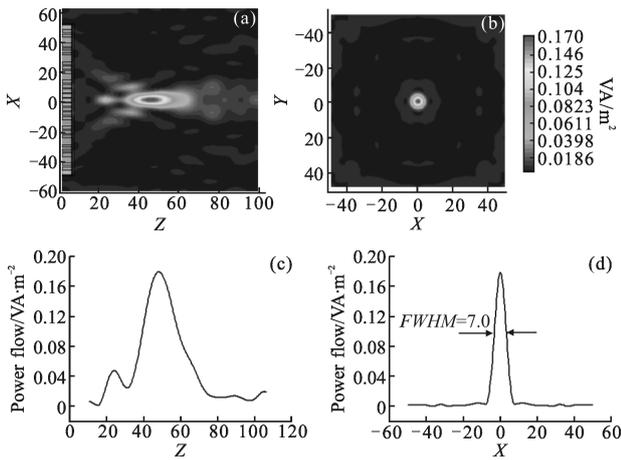


图 3 数值仿真结果

Fig.3 Results of numerical calculation

图 3(a)清楚地显示了区域中有两个焦点,这个主要是由于公式(2)中  $m$  的值决定的,如果  $m$  有不同的值,多余的焦点就会出现。可以看到透镜的主焦点在大约  $Z=49.8 \mu\text{m}$  处,而设计的焦点应在  $Z=50 \mu\text{m}$  处,这个误差和 FDTD 数值模拟计算的误差一致。另外,模拟得到焦斑的 FWHM 为  $7.0 \mu\text{m}$  左右,而且旁瓣非常小,理论的艾里斑半径应为  $6.5 \mu\text{m}$ ,可以看到焦斑的大小与衍射极限接近。能量利用率在模型中为 44%,它是指焦斑的能量与入射面总能量的比值,这个值在原来的高折射率金属结构透镜的基础上大大提高。

## 2 高折射率介质平板结构透镜的色散特性

分析该介质结构透镜的色散特性,同样针对  $10.6 \mu\text{m}$  波长设计  $100 \mu\text{m}$  口径、 $50 \mu\text{m}$  焦距的平板介质结构透镜。入射波长分别为  $9$ 、 $10.6$ 、 $12 \mu\text{m}$ 。分析了三种不同的入射光在出射面后的聚焦点位置以及光斑强度。用 FDTD 时域场仿真软件可以得到如图 4 所示的结果。

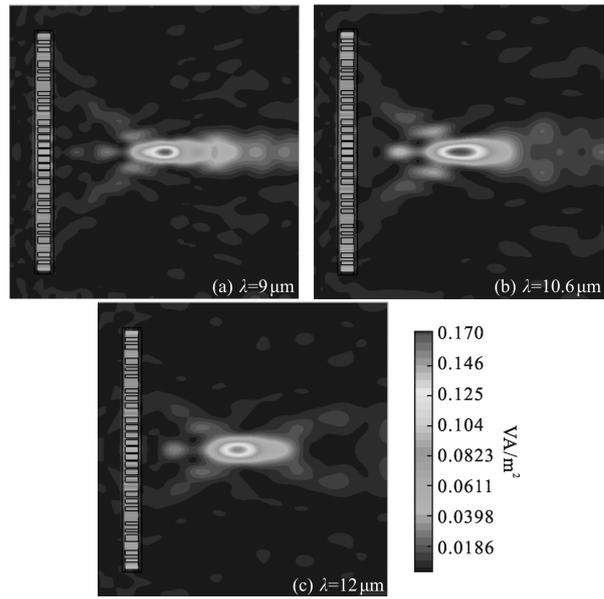


图 4 三种入射波长所得的  $X=0$  处能流图

Fig.4 Intensity distribution of three different wavelengths

对数据进行分析,得出的结果如表 1 所示。

表 1 不同波长入射结构透镜时的焦点位置及光斑强度

Tab.1 Focus position and maximum intensity of focal spot with different incident wavelengths

Incident wavelength/ $\mu\text{m}$	9	10.6	12
Coordinate value of focus/ $\mu\text{m}$	52.5	49.8	46.0
Maximum intensity of focus/ $\text{VA} \cdot \text{m}^{-2}$	0.165	0.180	0.151

从焦点位置可以看到,该透镜具有与普通几何光学透镜相反的色散特性,利用这种特性,可以用这种结构透镜与普通色散透镜组合消色差;或者在设计过程中针对不同波长设计不同带宽的环带来消色散,从而达到宽波段聚焦成像的目的<sup>[7-8]</sup>。

## 3 高折射率平板介质结构透镜实现小 $F$ 数

因为该平板结构透镜克服了最小特征尺寸的限制,所以实现快透镜(大数值孔径透镜)是可行的。针对相同口径、不同焦距的介质结构透镜,选择  $10.6 \mu\text{m}$  为设计波长设计以下 4 个结构透镜。

Lens1 :  $D=100 \mu\text{m}$ ,  $f=100 \mu\text{m}$ ,  $F$  数为 1

Lens2 :  $D=100 \mu\text{m}$ ,  $f=75 \mu\text{m}$ ,  $F$  数为 0.75

Lens3:  $D=100\ \mu\text{m}$ ,  $f=50\ \mu\text{m}$ ,  $F$  数为 0.5

Lens4:  $D=100\ \mu\text{m}$ ,  $f=25\ \mu\text{m}$ ,  $F$  数为 0.25

透镜中高折射率介质柱的大小在  $1.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$  之间, 介质柱长度为  $5.3\ \mu\text{m}$ , 环与环之间的间距均选为  $3\ \mu\text{m}$ 。所有透镜的占空比控制在近似相同。

通过计算机模拟仿真, 分析数据, 得出的结果如图 5 所示。

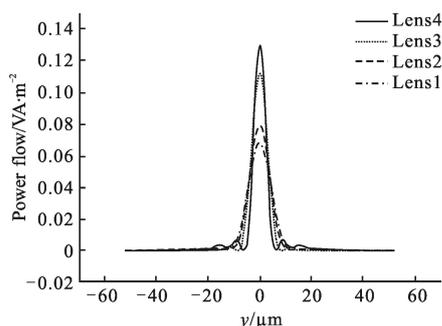


图 5 4 组具有相同口径、不同焦距的介质结构透镜在焦平面  $X=0$  处的强度分布

Fig.5 Intensity distribution along  $X=0$  in cross section with four lens of the same aperture and different focal lengths

从图 5 可以看出, 随着透镜焦距变短, 焦点处能量逐渐变大, 并且焦点变得更小, 可见该透镜可以实现大数值孔径和高能量利用率。唯一的不足是 Lens4 的旁瓣有些大, 这可能与设计过程中的误差有关。可见该透镜可以实现小的  $F$  数, 文中设计的透镜最小  $F$  数为 0.25, 而非涅耳透镜为了克服最小特征尺寸的限制, 只能实现  $F$  数大于 2.5 左右的透镜。

## 4 结 论

该种高折射率介质填充型结构透镜具有高的能量

利用率, 并克服了最小特征尺寸, 工艺实现也较为简单, 并且具有与普通透镜相反的色散特性, 故该透镜可以与普通透镜组合消色差。另外, 实现了最小  $F$  数为 0.25 的结构透镜。在高分辨率成像以及快速聚焦方面, 高折射率介质填充型结构透镜具有很大的潜在应用。

## 参考文献:

- [1] Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 1998: 4-16. (in Chinese)
- [2] Kipp L, Skibowski M, Johnson R L, et al. Shaper images by focusing soft X-ray with photon sieve [J]. *Nature*, 2001, 414: 184.
- [3] Ebbesen T W. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391: 667.
- [4] Chen Yanzhong, Zhou Chongxi, Luo Xiangang, et al. Structured lens formed by a 2D square hole array in a metallic film[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 753G.
- [5] Yin Shaoyun, Zhou Chongxi, Luo Xiangang, et al. Imaging by a sub-wavelength metallic lens with large field of view[J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2578.
- [6] Chen Sujuan, Zhou Chongxi. A large numerical aperture structured lens formed by varying high-refractive-index-dielectric square holes [J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(7): 570-575.
- [7] Wei Wei, Huang Jintang, Wang Keyi. Dispersive property and the multiple wavelength focusing simulation of photon sieve [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 830-834. (in Chinese)
- [8] Ma Tao, Shen Yibing, Yang Guoguang. Improving diffraction efficiency of DOE in wide waveband application by multilayer micro-structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 119-123. (in Chinese)