

文章编号: 0253-2239(2008)06-1124-07

# 多台阶圆形衍射微透镜聚焦性能的矢量分析

刘玉玲 隋成华 李 博

(浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要** 给出了基于旋转体时域有限差分法的严格的矢量分析模型,应用该模型分析了多个多台阶圆形衍射微透镜的设计实例。研究了设计参量和制作误差对其聚焦性能的影响。结果表明增加环带数,但保持其他设计参量例如焦距、入射波长不变时,焦点场强增大、焦斑变小、焦深变短;只增加台阶数时,聚光作用加强,但台阶数达到 8~10 后,聚焦效果趋向稳定,因此建议在实际加工中,台阶数选择 8~10。用二元掩模板套刻制作多台阶时,容易产生制作误差。设计了在第三次套刻制成 8 个台阶过程中产生了对准误差和系统刻蚀误差的两类多台阶微透镜。分析结果表明对准误差对多台阶微透镜聚焦效果的影响较大,加工时要尽量避免,而系统刻蚀误差对多台阶微透镜聚焦效果的影响较小。

**关键词** 衍射光学; 聚焦性能; 时域有限差分法; 多台阶微透镜

**中图分类号** O486.1 **文献标识码** A

## Vector analysis of Focusing Performance of Multilevel Circular Diffractive Microlens

Liu Yuling Sui Chenhua Li Bo

(College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

**Abstract** A rigorous vector analysis model based on body-of-revolution (BOR) finite-difference time-domain (FDTD) method is presented, many design examples of multilevel circular microlens are analyzed by this model, and the influence of design parameters and fabrication error on the focusing performance of the designed microlens is investigated. The results show that the electric field magnitude on focus increases, and the focal radius and focal depth diminish when the zone number is increased but other parameters such as focal length and incident wavelength are constant. The focusing effect is intensified when adding step number only, but after the step number adds to 8~10, the focusing effect tends to be stable. It's suggested that the step number is set as 8~10 in actual fabrication. When binary mask is used to lithograph the multilevel, fabrication error is easily generated. Two kinds of multilevel microlens with alignment error or system etching error are designed, which generate the above error in the third etching process of fabricating eight levels. Analysis result shows that the alignment error has passive influence on the focusing effect of multilevel microlens, so it should be avoided in fabrication, but the system etching error has little influence on the focusing effect of multilevel microlens.

**Key words** diffractive optics; focusing performance; finite-difference time-domain method; multilevel microlens

## 1 引 言

衍射微透镜基于菲涅耳波带片原理设计而成,与普通的折射型透镜相比,具有厚度小、重量轻、容易复制等特点,在光学传感<sup>[1]</sup>,红外探测<sup>[2]</sup>等方面有广泛的应用。由于连续面型的衍射微透镜难于加工,人们常用多台阶结构来近似连续面形结构。而当环带数较大时,越靠近微透镜边缘处台阶宽度越小,达到微米甚至纳米量级,产生亚波长结构,作为分析手段的

标量衍射理论的假设和近似不再成立,需要采用严格的矢量衍射分析方法。时域有限差分法(Finite-difference time-domain method, FDTD)是目前被广泛使用的矢量电磁场计算方法。Dennis W. Prather等<sup>[3]</sup>将旋转体时域有限差分法(Body of revolution finite-difference time-domain method, BOR FDTD)用于衍射微透镜的分析。之后又有研究者采用二维的时域有限差分法分析衍射微透镜<sup>[5,6]</sup>。但没有具

收稿日期: 2007-09-12; 收到修改稿日期: 2007-11-30

作者简介: 刘玉玲(1971—),女,讲师,博士,主要从事微光学元件的分析、设计与制作等方面的研究。

E-mail: lucy1971lyl@yahoo.com.cn

体分析衍射微透镜的环带数和台阶数的变化以及制作误差对其聚焦性能的影响。而这些问题对衍射微透镜的设计与制作具有重要的指导意义。文中应用旋转体时域有限差分法作为严格的矢量分析模型,研究了环带数和台阶数及对准误差和系统刻蚀误差对微透镜聚焦性能的影响。

## 2 多台阶衍射微透镜

菲涅耳衍射微透镜具有多个波带结构,如图 1 所示。

波长为  $\lambda$  的入射平面波经过菲涅耳衍射微透镜后会聚在焦点  $F$  上,设第  $m$  个波带的半径为  $r_m$ ,则

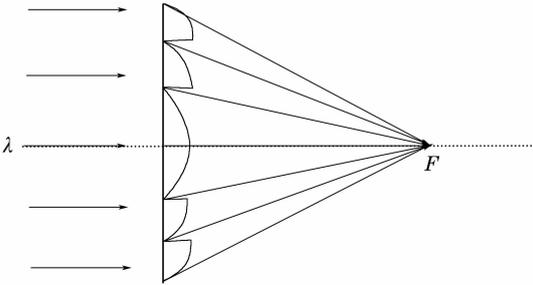


图 1 菲涅耳衍射微透镜

Fig. 1 Fresnel diffractive microlens

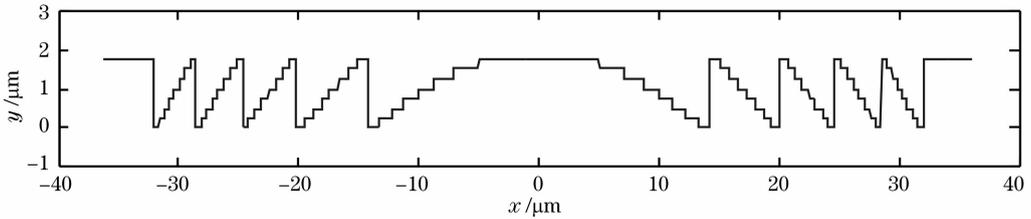


图 2 多台阶圆形衍射微透镜的径向截面

Fig. 2 Radial cross section of multilevel circular diffractive microlens

## 3 理论分析模型

利用旋转体时域有限差分法<sup>[3]</sup>建立分析模型,此方法不仅可以对多台阶圆形衍射微透镜进行精确地模拟,而且能将三维问题转化为二维问题,因此大大简化了计算,节约了时间。

旋转体时域有限差分法的物理原理是安培环路定律和法拉第电磁感应定律<sup>[7]</sup>:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \sigma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}, \quad (6)$$

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}. \quad (7)$$

有

$$\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{r_m^2 + f^2} - f) = 2\pi m, \quad (1)$$

由(1)式可以求出每一波带的半径  $r_m$  为

$$r_m = \sqrt{2m\lambda f + (m\lambda)^2}. \quad (2)$$

由于连续浮雕面形的菲涅耳衍射微透镜难于加工,人们常用多台阶结构来逼近连续轮廓。制作时常进行等相位量化,设量化级数为  $L$ ,光程差满足条件<sup>[6]</sup>:

$$\sqrt{r_{m,l}^2 + f^2} - f = \lambda [(m-1) + l/L], \quad (3)$$

由(3)式可以求出第  $m$  带第  $l$  层半径  $r_{m,l}$  为

$$r_{m,l} = \sqrt{2\lambda f \left[ (m-1) + \frac{l}{L} \right] + \lambda^2 \left[ (m-1) + \frac{l}{L} \right]^2}, \quad (4)$$

$$l = 1, 2, \dots, L$$

台阶高度为

$$h_l = \frac{\lambda}{\Delta n} (l-1)/L, \quad (5)$$

(5)式中  $\Delta n$  为衍射微透镜材料折射率与周围介质折射率之差。

根据以上公式设计的一个多台阶圆形衍射微透镜的径向截面如图 2 所示。其焦距为  $100 \mu\text{m}$ ,入射波长  $1 \mu\text{m}$ ,5 个环带,8 个台阶,材料折射率 1.5,直径  $64.04 \mu\text{m}$ ,特征尺寸即最小台阶宽度为  $0.41 \mu\text{m}$ 。

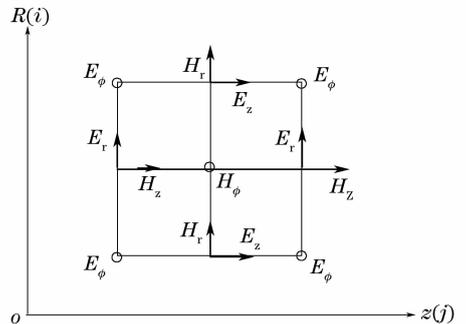


图 3 旋转体时域有限差分网格中的电磁场各分量

Fig. 3 Electromagnetic field components in

BOR FDTD mesh

在柱坐标系中将电场强度  $\mathbf{E}$  分解为三个分量  $E_r, E_\phi, E_z$ ,磁场强度  $\mathbf{H}$  也分解为三个分量  $H_r, H_\phi, H_z$ 。

考虑到轴对称性,使得方位角具有周期性,可把电磁场的六个分量对  $\phi$  展开为傅里叶级数的形式,这样就省去了变量  $\phi$ 。从三维坐标系  $r, \phi, z$  变为二维坐标系  $r, z$ 。用 Yee 氏网格将电磁场分量在空间中离散,使得每一个电场分量由磁场分量所环绕,每一个磁场分量由电场分量所环绕。并且电场分量和磁场

分量彼此间隔,建立起计算网格空间,各分量空间分布如图 3 所示。

将各分量的傅里叶级数式代入(1)式、(2)式,并考虑入射场的极化对各电磁分量奇偶性的影响<sup>[3]</sup>,用中心差分替代各场分量对空间、时间的微分,可以得到计算各场分量的基本差分公式:

$$E_r \Big|_{i+1/2, j+1/2}^{n+1/2} = \frac{2\epsilon - \sigma\Delta t}{2\epsilon + \sigma\Delta t} E_r \Big|_{i+1/2, j+1/2}^{n-1/2} + \frac{2m\Delta t}{(2\epsilon + \sigma\Delta t)(i+1/2)\Delta r} H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2}^n - \frac{2\Delta t}{(2\epsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} [H_\phi \Big|_{i+1/2, j+1}^n - H_\phi \Big|_{i+1/2, j}^n], \quad (8)$$

$$E_\phi \Big|_{i, j+1/2}^{n+1/2} = \frac{2\epsilon - \sigma\Delta t}{2\epsilon + \sigma\Delta t} E_\phi \Big|_{i, j+1/2}^{n-1/2} - \frac{2\Delta t}{(2\epsilon + \sigma\Delta t)\Delta r} [H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2}^n - H_z \Big|_{i-1/2, j+1/2}^n] + \frac{2\Delta t}{(2\epsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} [H_r \Big|_{i, j+1}^n - H_r \Big|_{i, j}^n], \quad (9)$$

$$E_z \Big|_{i, j}^{n+1/2} = \frac{2\epsilon - \sigma\Delta t}{2\epsilon + \sigma\Delta t} E_z \Big|_{i, j}^{n-1/2} + \frac{2\Delta t}{(2\epsilon + \sigma\Delta t)i\Delta r} [(i+1/2)H_\phi \Big|_{i+1/2, j}^n - (i-1/2)H_\phi \Big|_{i-1/2, j}^n] - \frac{2m\Delta t}{(2\epsilon + \sigma\Delta t)i\Delta r} H_r \Big|_{i, j}^n, \quad (10)$$

$$H_r \Big|_{i, j}^{n+1} = H_r \Big|_{i, j}^n + \frac{m\Delta t}{\mu i\Delta r} E_z \Big|_{i, j}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{\mu\Delta z} [E_\phi \Big|_{i, j+1/2}^{n+1/2} - E_\phi \Big|_{i, j-1/2}^{n+1/2}], \quad (11)$$

$$H_\phi \Big|_{i+1/2, j}^{n+1} = H_\phi \Big|_{i+1/2, j}^n + \frac{\Delta t}{\mu\Delta r} [E_z \Big|_{i+1, j}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i, j}^{n+1/2}] - \frac{\Delta t}{\mu\Delta z} [E_r \Big|_{i+1/2, j+1/2}^{n+1/2} - E_r \Big|_{i+1/2, j-1/2}^{n+1/2}], \quad (12)$$

$$H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2}^{n+1} = H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2}^n - \frac{m\Delta t}{\mu(i+1/2)\Delta r} E_r \Big|_{i+1/2, j+1/2}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2)\Delta r} [(i+1)E_\phi \Big|_{i+1, j+1/2}^{n+1/2} - i \cdot E_\phi \Big|_{i, j+1/2}^{n+1/2}], \quad (13)$$

公式中  $\epsilon, \mu, \sigma$  分别为介电常数、磁导率和电导率,  $\Delta r, \Delta z$  分别为  $r, z$  方向上的空间步长,  $\Delta t$  为时间步长,空间步长  $\Delta r, \Delta z$  与时间步长  $\Delta t$  的选取要考虑数值色散与数值稳定条件,通常情况  $\min\{\Delta r, \Delta z\} \leq \lambda/20$ ,  $\lambda$  为入射波长,  $\Delta t \leq \min\{\Delta r, \Delta z\}/sc$ ,  $c$  为真空中的光速,  $n$  指时间步,  $m$  为模式数,当  $m=0$  时  $s=\sqrt{2}$ ,  $m \geq 1$  时  $s=m+1$ <sup>[7]</sup>。对于垂直入射的平面波,  $m=1$ 。由(8)式~(13)式可见每个网格点的电场分量决定于与他相邻的磁场分量及上一时间步的值。同样每个网格点的磁场分量决定于与他相邻的电场分量及上一时间步的值。计算每一时间步空间各网格的电磁场分量值,随着时间步的推进,就可以模拟电磁波在网格空间中的传播。这种空间上相互套连、时间上前后依赖的关系方便了计算机的迭代运算。

然而计算空间不能无限扩展,需要设置截断边界。在截断边界处要设法消除非物理因素引起的电磁波的反射,即吸收外行波,来模拟电磁波在无限空

间中的传播。这里应用目前效果最好的完全匹配层吸收边界条件<sup>[8,9]</sup> (Perfectly matched layer absorbing boundary conditions, PML ABCs)。

整个分析过程可用图 4 说明。图 4 中坐标轴由  $R, Z$  两轴构成,其中  $Z$  轴为旋转对称轴。把内部计算空间划分为总场和散射场的方法设置入射波源。中心区域是总场,外围是散射场,元件位于总场内,通过赋予网格点电磁参量的方法来模拟元件的电磁

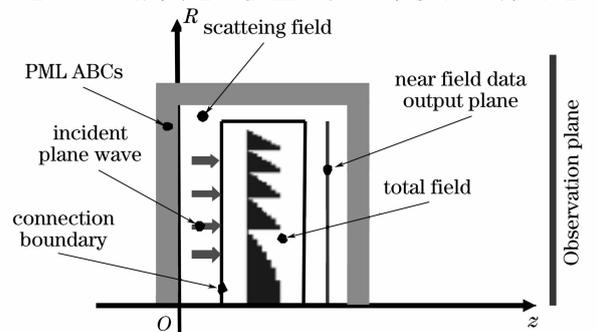


图 4 旋转体时域有限差分法分析模型示意图  
Fig. 4 BOR FDTD analysis model diagram

结构。总场内计算的是入射波和散射波的矢量和, 散射场内只计算散射波, 总场与散射场的交界处为连接边界, 垂直入射的平面波在连接边界处通过对入射波的加减引入总场。

在迭代运算开始以前, 计算空间内所有的电磁场分量初值赋零。而后平面波源被接通, 随着时间步的推进, 入射平面波由连接边界向总场区内传播。当碰到被分析的元件时与它发生相互作用而产生散射波, 散射波再通过连接边界向散射场传播。遇到完全匹配层后能够比较理想的被吸收掉, 好像在无限空间中传播一样。经过足够的时间步以后, 总场和散射场都达到稳态分布。

在散射场内设置一个近场数据输出平面, 如图 4 所示。达到稳态以后, 对该面上各电磁分量进行一个简单的傅里叶变换将时域值变为频域值, 然后通过平面波谱传播算法<sup>[10]</sup>计算出观察屏上的场分布。

## 4 特性分析

在制作多台阶衍射微透镜时, 有时要求的焦距是一定的, 这就要考虑制作几个环带或者微透镜的孔径取多少比较合适。此外台阶数的选取不仅影响衍射微透镜的聚焦效果, 而且涉及加工的难易。可以用多次套刻<sup>[11-12]</sup>或者灰度掩模<sup>[13]</sup>的工艺制作多台阶。前者台阶数直接决定了套刻的次数, 而在实际加工过程中多次套刻会引起套刻对准误差, 也容易出现刻蚀深度误差。模型中总场的实际尺寸在  $R$  方向上略大于微透镜的半径, 而环带数越多微透镜的半径就越大,  $R$  方向的计算网格就越多, 在  $Z$  方向总场的实际

尺寸略大于微透镜的厚度。散射场在  $R$  方向设置了 12 个网格,  $Z$  方向总场两侧的散射场都设置了 20 个网格。吸收层的厚度设置为 8 个网格, 电导率按抛物线规律增加, 垂直入射的反射系数设为 0.0001%。

### 4.1 微透镜的环带数对聚焦效果的影响

一组微透镜, 折射率为 1.5, 入射波长  $\lambda=1 \mu\text{m}$ , 台阶数 8, 焦距  $f=100 \mu\text{m}$  都不变, 而环带数目按照 6、8、10、12、14、16 依次增加, 微透镜半径随之增大。通过分析模型的计算得出焦平面上的电场强度如图 5 所示, 沿光轴电场强度如图 6 所示。

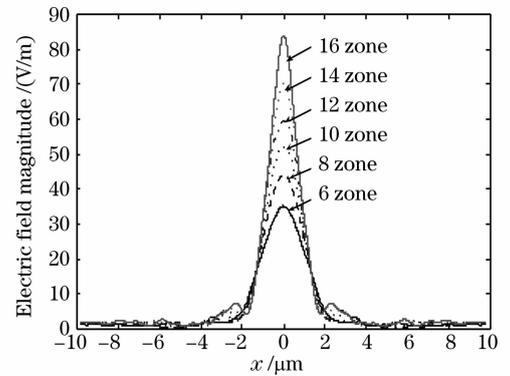


图 5 不同环带数的微透镜焦平面上的电场大小  
Fig. 5 Electric fields magnitude on the focal plane of microlenses with different zone number

由图 5 的数据可知每个微透镜在焦平面上的最大场强和焦斑大小。这里的焦斑半径指焦平面上中心最大场强值和第一个极小值的距离; 由图 6 可知焦深, 取电场强度高于最大场强值的 80% 的轴向距离作为焦深。这个取值范围由曲线峰值下的横线画出, 其长度表示出了焦深的长短。具体数值见表 1。

表 1 最大场强、焦斑半径、焦深随环带个数的变化

Table 1 Calculated relationship of maximal electric field magnitude, focal radius, focal depth with zone number

Zone number	6	8	10	12	14	16
Microlenses diameter / $\mu\text{m}$	70.32	81.58	91.66	100.84	109.48	117.58
$F$ number	1.42	1.23	1.09	0.99	0.91	0.85
Maximal electric field magnitude / (V/m)	34.98	44.06	52.05	59.27	70.28	83.82
Focal radius / $\mu\text{m}$	2.92	2.72	2.22	2.18	1.98	1.80
Focal depth / $\mu\text{m}$	10.73	8.7	6.98	6.86	5.73	4.62

微透镜的直径增加, 则入射光的总能量增加, 最大场强也会增加。表格 1 的数据说明了这一因果关系。对于圆孔的夫琅和费远场衍射, 入射波长与焦距一定时, 艾里斑半径与圆孔的直径成反比<sup>[14]</sup>。本文研究的是多台阶微透镜的近场衍射问题, 但从表 1 的

数据可以看出随着微透镜直径的增加, 焦斑半径减小。这一规律与圆孔的夫琅和费衍射相似。从表 1 的数据还可以看出随着环带数增加, 焦深变短。以上分析结果说明, 随着环带数的增加, 焦斑中心场强增大, 焦斑变小, 焦深变短。

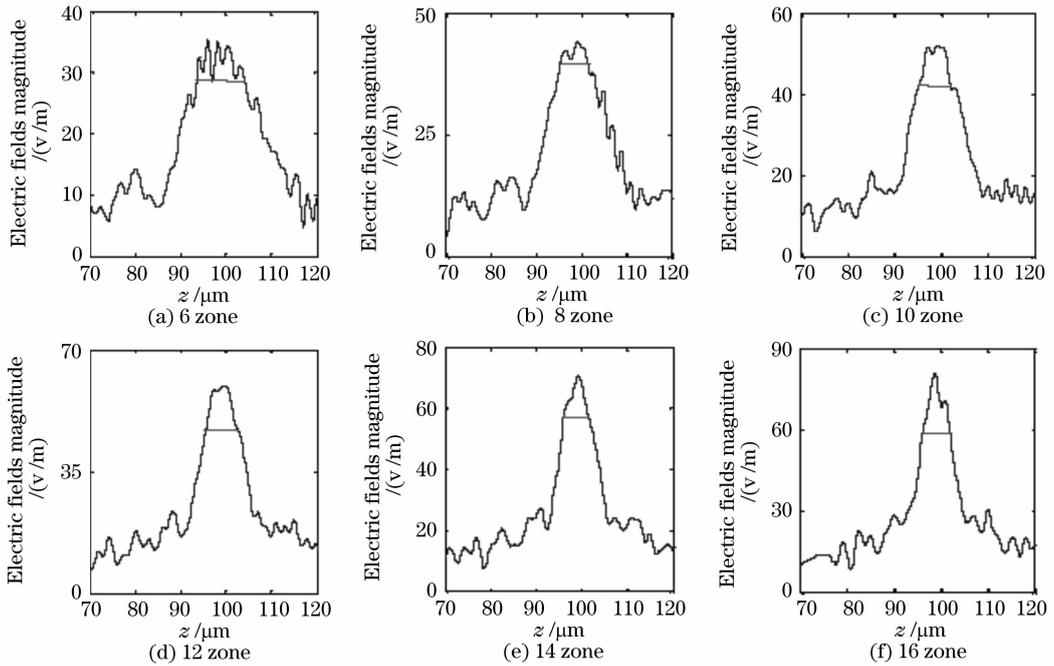


图 6 不同环带数的微透镜沿光轴的电场强度

Fig. 6 Electric fields magnitude along the optical axis of microlens with different zone number

#### 4.2 微透镜的台阶数对聚焦性能的影响

虽然标量衍射理论关于台阶个数与衍射效率的关系给出了计算公式<sup>[15]</sup>,但对于特征尺寸小于入射波长的衍射微透镜,标量衍射理论已不再精确。

设计一组微透镜,其焦距  $f=150\ \mu\text{m}$ ,波长  $\lambda=1\ \mu\text{m}$ ,波带数为 10,微透镜直径  $111.36\ \mu\text{m}$  都相同,而台阶数依次取 4、6、8、10、12、16、20、30。由于台阶数增加,使得微透镜的特征尺寸即台阶最小宽度减

小。为了实现对微透镜电磁结构的精确模拟,空间步长的取值要随台阶数的增加而减小,例如:台阶数是 8 时,特征尺寸为  $0.361\ \mu\text{m}$ ,取  $\Delta r=\Delta z=\lambda/20$ ,台阶数为 30 时,特征尺寸为  $0.096\ \mu\text{m}$ ,取  $\Delta r=\Delta z=\lambda/50$ 。图 7(a) 是各微透镜在焦平面上的场强分布。为指示出场强曲线与微透镜的对应关系,图 7(b) 给出了图 7(a) 顶部区域放大图。

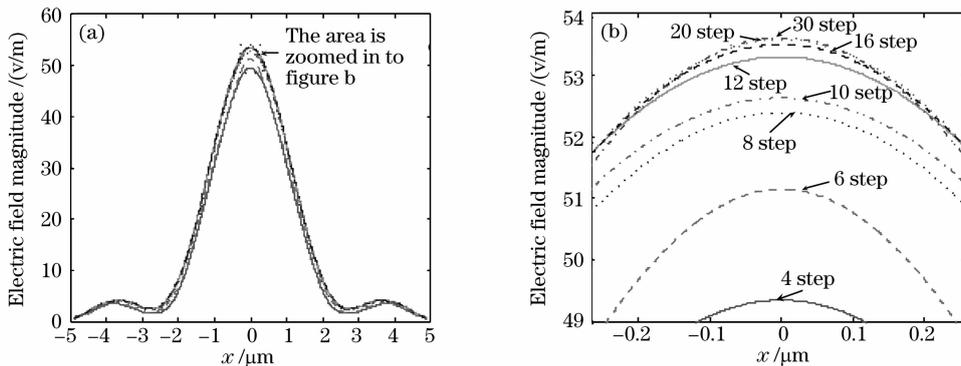


图 7 不同台阶个数的微透镜焦平面上的电场大小。(a) 焦平面上的电场大小,(b) 图 7(a) 顶部放大图

Fig. 7 Electric fields magnitude on focal plane of microlenses with different step number. (a) Electric fields magnitude on focal plane, (b) zoomed on the top curve of Fig. 7(a)

表 2 的数据中焦斑半径基本相同。这是由于这几个不同台阶数的微透镜的焦距、波长、微透镜孔径都相同的缘故。由于各微透镜的直径相同,入射光的总能量相同,但随着台阶数增加,微透镜的面型更接近连续面型,对光的会聚作用加强。因此最大场

强和聚焦效率会有所增加。根据表 2 的数据可以看出,这种加强作用在台阶数增大到 8~10 以后不再明显,因此在实际加工中,建议台阶数选择 8~10 就可以了。

表 2 最大场强、焦斑半径、聚焦效率随微透镜台阶个数的变化

Table 1 Calculated relationship of maximal electric field magnitude, focal radius, focusing efficiency with step number of microlens

Step number	4	6	8	10	12	16	20	30
Maximal electric field magnitude / (V/m)	49.36	51.15	52.39	52.62	53.29	53.50	53.57	53.60
Focal radius / $\mu\text{m}$	2.67	2.79	2.73	2.74	2.75	2.75	2.75	2.75
Focusing efficiency / %	81.51	84.28	83.97	83.55	83.69	83.95	83.86	84.01

### 4.3 误差分析

用二元掩模板经过多次套刻形成多台阶时会产生制作误差<sup>[15]</sup>,包括横向误差和纵向误差。

从套刻的工艺过程可知,第一次刻蚀产生 2 个

台阶,第二次刻蚀产生 4 个台阶,第三次刻蚀产生 8 个台阶<sup>[15]</sup>。这里设计一个多台阶衍射微透镜,设计参量:焦距 60.00  $\mu\text{m}$ ,半径 27.50  $\mu\text{m}$ ,环带数为 6,台阶数为 8,如图 8 曲线(a)所示。

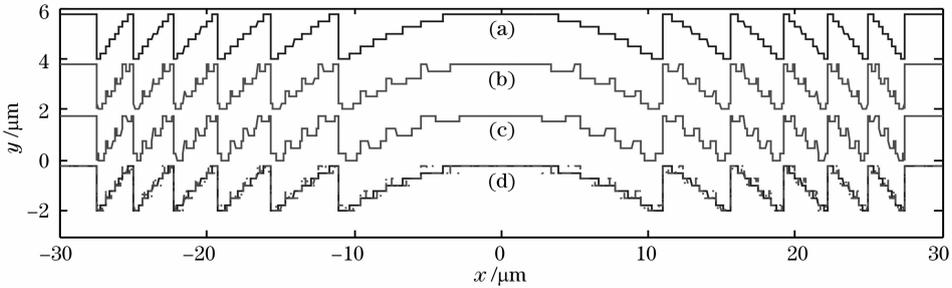


图 8 做对准误差分析的微透镜。(a)原设计的微透镜,(b)33%偏移的对准误差微透镜,(c)67%偏移的对准误差微透镜,(d)三个微透镜的重叠图

Fig. 8 Microlenses for alignment error analysis. (a) Designed microlens, (b) alignment error microlens with 33% shift, (c) alignment error microlens with 67% shift, (d) overlapped figure of the three microlenses

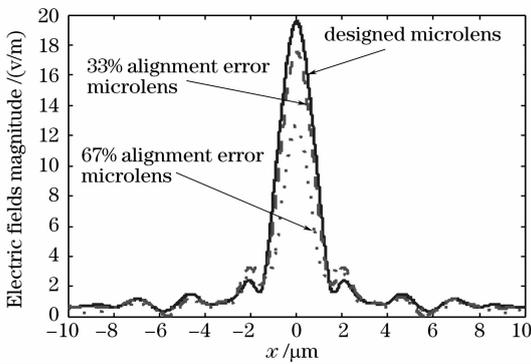


图 9 对准误差分析中的各微透镜焦平面上的电场大小  
Fig. 9 Electric field magnitude in the focal plane of microlenses for alignment error analysis

假设在第三次套刻中存在对准误差,则 1、3、5、7 台阶偏离了原设计位置,设每一环带内 1、3、5、7 台阶都向透镜中心靠近,图 8 中曲线 b 偏移了各自台阶宽度的 33%,图 8 中曲线 c 偏移了各自台阶宽度的 67%。对这三个微透镜进行分析,得出对应于图 8 中曲线 a、b、c 三个微透镜的聚焦效率分别为 72.75%, 65.94%, 55.02%,图 9 给出了这三个微透镜在焦平面上的电场大小分布。由图 8 直观地看出对准误差对微透镜设计面形的改变较大,根据分析结果可知对准误差对微透镜的聚焦效果影响也较大。

原设计的微透镜与图 8 中曲线(a)的相同,假设在第 3 次套刻中产生了系统刻蚀误差,第 1、3、5、7

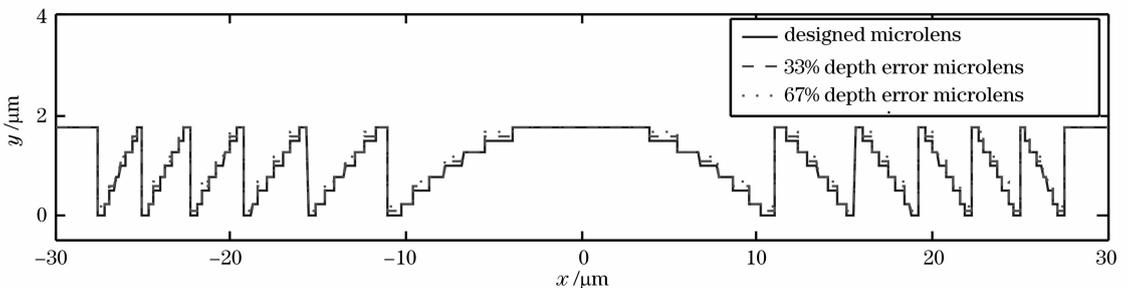


图 10 作深度误差分析的微透镜  
Fig. 10 Microlens for depth error analysis

台阶的深度比原设计深度分别浅了 33% 和 67%，面形如图 10 所示。分析得出相应于原设计微透镜、33% 刻蚀深度误差微透镜、67% 刻蚀深度误差微透镜的聚焦效率分别为 72.75%，71.72%，69.77%。这三个微透镜在焦平面上的电场大小如图 11 所示。从分析结果看系统刻蚀误差对微透镜的影响较小，这可以从 4.2 的分析中得到解释。第三次套刻使台阶数从 4 个变为 8 个，而 8 台阶微透镜比 4 台阶微透镜的聚焦效果提高不是很大。因此第三次刻蚀虽然浅了，但其聚焦效果应该介于 4~8 台阶之间。

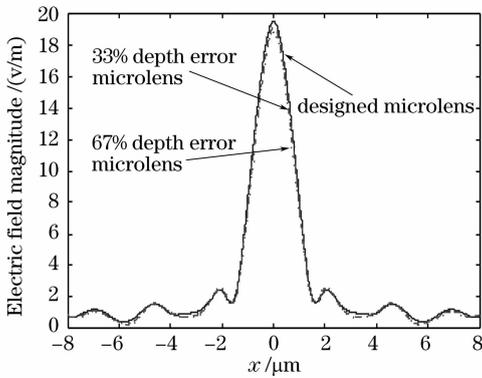


图 11 深度误差分析中各微透镜的焦平面上的电场强度

Fig. 11 Electric field magnitude in the focal plane of microlenses for depth error analysis

## 5 结 论

以旋转体时域有限差分法为矢量分析模型，研究了圆形多台阶衍射微透镜的环带数和台阶数以及制作误差对其聚焦性能的影响。结果表明，增加环带数会使焦斑中心场强增大、焦斑变小、焦深变短；增加台阶数会使聚焦效果加强，但台阶数达到 8~10 个以后，聚焦效果趋于稳定；对准误差对多台阶微透镜的影响较大，但系统刻蚀误差对微透镜的影响较小。文中对以上分析结果作了定性解释。

## 参 考 文 献

- Jia Shuhai, Kong Weijun, Yang Jia. Design of optical acceleration sensor based on diffractive micro lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1494~1497
- 贾书海,孔维军,杨佳. 基于衍射微透镜的光学加速度传感器设计[J]. *光学学报*, 2007,**27**(8): 1494~1497

- Dennis W. Prather. Design and application of subwavelength diffractive lenses for integration with infrared photodetectors[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(5): 870~878
- Dennis W. Prather, Shouyuan Shi. Formulation and application of the FDTD method for the analysis of axially symmetric diffractive optical elements[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1999, **16**(5): 1131~1143
- Jianhua Jiang, Gregory. P. Nordin. A rigorous unidirectional method for designing finite aperture diffractive optical elements [J]. *Opt. Exp.*, 2000, **7**(6): 237~242
- Feng Di, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Rigorous concept for the analysis of diffractive lenses with different axial resolution and high lateral resolution[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(17): 1987~1994
- Du Chunlei, Zhou Lishu, Qiu Chuankai *et al.*. Study and application of diffractive microlens array[J]. *Optical Technique*, 1998, **24**(3): 17~22
- 杜春雷,周礼书,邱传凯等. 衍射微透镜阵列的研究与应用[J]. *光学技术*, 1998, **24**(3): 17~19
- Allen Taflove, Susan C. Hagness. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* [M]. Boston·London: Artech House, 2000. 530~549
- Jean-Pierre Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *J. Computational Physics*, 1994, **114**: 185~200
- Yuling Liu, Zhengwu Lu, Zhibin Ren *et al.*. Perfectly matched layer absorbing boundary conditions in rigorous vector analysis of axially symmetric diffractive optical elements [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **223**(8): 39~45
- Shouyuan Shi, Dennis W. Prather. Vector-based plane-wave spectrum method for the propagation of cylindrical electromagnetic fields[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1445~1447
- Zhao Guangxing, Chen Hong, Yang Guoguang. Acceptable error of etching depth in ion beam etching microlens[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 113~116
- 赵光兴,陈洪,杨国光. 离子束蚀刻微透镜中蚀刻深度允许误差的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1): 113~116
- Shi Weijie, Wang Xiangchao, Zhang Dongqing *et al.*. An in-situ method for measuring the overlay performance of a lithographic system with mirror-symmetry FOCAL marks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 398~402
- 施伟杰,王向朝,张冬青等. 基于镜像焦面检测对准标记的套刻性能原位测量技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 398~402
- Shen Tingzheng, Lü Haibao, Gao Yiqing *et al.*. Research of mask division for improving the edge sharpness of photolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 533~537
- 谌廷政,吕海宝,高益庆等. 掩模分形提高光刻边缘锐度的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 533~537
- Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. Third Edition, . Qin Kecheng, Lin Peisen, Chen Jiabi *et al.* transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 68~71
- Joseph W. Goodman. 傅里叶光学导论[M]. 第三版,秦克诚,刘培森,陈家壁等译,北京:电子工业出版社,2006. 68~71
- Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 22~25, 298~335
- 金国藩,严瑛白,邹敏贤等. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社,1999. 22~25, 298~335