

# 亚波长衍射微透镜的设计\*

刘玉玲 卢振武 任智斌 李凤有 曹召良 孙强

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,应用光学国家重点实验室,长春 130022)

**摘要** 设计了连续浮雕衍射微透镜和与其等效的二元亚波长衍射微透镜,采用旋转体时域有限差分法对通过计算机辅助设计出的元件进行了严格的矢量分析,给出了各元件在焦平面的场强分布. 分析结果表明,本文设计的二元亚波长微透镜对连续浮雕微透镜有很好的等效效果;填充因子的脉冲宽度调制法要优于填充因子的线性近似法;制作相对误差不大时深度误差和宽度误差对微透镜聚光能力的影响不大.

**关键词** 亚波长;衍射;微透镜;时域有限差分法

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A

## 0 引言

微透镜具有会聚光能及成像的作用,可广泛应用于激光束整形、红外光电探测器、出入光纤和光波导的耦合系统等. 已有文献报道,采用激光直写<sup>[1]</sup>等技术可以制作连续浮雕结构微透镜,但是制作工艺仍不成熟,制作出的元件也不理想,人们多采用二元光学技术用多台阶结构来近似连续浮雕结构. 然而,多台阶的制作通常需要多套模版,制作过程中需要多次曝光和刻蚀,制作周期长,成本高,而且制作特征尺寸为亚微米及纳米量级的多台阶微透镜非常困难<sup>[2]</sup>. 为了避免上述问题,人们探索用单台阶结构微透镜来等效多台阶和连续浮雕结构微透镜,以便通过电子束直写和离子束刻蚀<sup>[3]</sup>等技术比较容易的制作出来<sup>[4]</sup>. 因此,有必要研究能够等效多台阶和连续浮雕微透镜的单台阶结构衍射微透镜(二元亚波长微透镜)的设计方法.

本文对亚波长微透镜进行设计,首先设计了连续浮雕微透镜,然后结合标量衍射理论与等效介质理论,采用填充因子的脉冲宽度调制法设计出了等效连续浮雕微透镜的二元亚波长微透镜,并与采用填充因子的线性近似法设计出的二元亚波长微透镜做了对比. 为了检验二元亚波长微透镜对连续浮雕微透镜的等效效果和制作误差对微透镜聚焦能力的影响,本文采用旋转体时域有限差分法对设计出的微透镜进行了分析,给出了各元件在焦平面的电场强度分布.

## 1 亚波长衍射微透镜的设计原理与方法

亚波长衍射微透镜属于纯相位光学元件,入射光通过该类元件产生预定的相位变化,从而实现聚焦等目的. 对于连续浮雕微透镜,相位变化是通过浮雕深度变化实现的,而对于单台阶的二元亚波长衍射微透镜,则是通过调节填充因子的大小产生渐变折射率,从而实现预定的相位变化,本文依据这一思路设计连续浮雕微透镜和二元亚波长微透镜.

焦距为 $f$ 的 Fresnel 衍射微透镜对波长为 $\lambda$ 的入射平面波的相位变化函数为<sup>[5]</sup>

$$\phi(r) = 2\pi L + (2\pi f/\lambda) \times [1 - \sqrt{1 + (r/f)^2}] \quad (1)$$

式中 $L$ 为波带数.

对于连续浮雕面形的 Fresnel 衍射微透镜,它的基底折射率为常数,相位变化是通过浮雕深度变化实现的,浮雕深度可以表示为<sup>[6]</sup>

$$h(r) = \frac{\phi(r)}{\Delta n} \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2)$$

式中 $\phi(r)$ 由式(1)确定; $\Delta n$ 为微透镜材料与周围介质折射率差; $\lambda$ 为入射波波长. 式(2)同时确定了连续浮雕 Fresnel 衍射微透镜的面形.

由于连续浮雕微透镜和多台阶微透镜难于加工,人们探索用单台阶结构微透镜来等效多台阶以至连续浮雕微透镜. 以下应用标量衍射理论和等效介质理论,给出了单台阶结构微透镜,即二元亚波长衍射微透镜的设计方法,用它等效其对应的连续浮雕微透镜.

二元亚波长衍射微透镜是由渐变折射率 $n(r)$ 实现相位变化 $\phi(r)$ . 根据标量衍射理论,要实现相位变化 $\phi(r)$ ,对应的渐变等效折射率 $n_{\text{eff}}(r)$ 可以表示为<sup>[4]</sup>

$$n_{\text{eff}}(r) = (n_r - 1) [\phi(r)/\phi_0] + 1 \quad (3)$$

\* 中国科学院创新课题(2002LQ. 04)资助项目

Tel: 0431-5261849 Email: lucy19711yl@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-02-24

式中  $n_r = n_s/n_0$ ,  $n_s$  为透镜材料折射率,  $n_0$  为周围介质折射率;  $\phi(r)$  由式(1)确定;  $\phi_0$  为最大相位, 与刻蚀深度  $d$  有关, 可表示为<sup>[7]</sup>

$$\phi_0 = 2\pi d n_0 (n_s - 1) / \lambda \quad (4)$$

等效介质理论不仅适用于周期结构的光栅, 也可以推广到非周期结构的微透镜, 只是对于周期结构的光栅, 填充因子  $f$  为常数, 对于非周期结构的微透镜, 填充因子是随径向变化的函数  $f(r)$ . 二元亚波长微透镜为轴对称单台阶圆环状结构, 其径向类似于分布了一排深度相同但宽窄不同的沟槽, 根据等效介质理论, 调节沟槽的宽度与间距, 即改变填充因子的大小, 相应地可以调节等效折射率的大小, 实现了折射率的渐变已达到对相位的调制. 以下采用脉冲宽度调制法来确定填充因子  $f(r)$ , 对应的二元亚波长微透镜的面形函数为  $t(r)$ <sup>[8]</sup>

$$t(r) = df(r) = d \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{r - m\Delta - g_m\Delta/2}{g_m\Delta} \right) \quad (5)$$

式中  $d$  为元件刻蚀深度;  $\Delta$  是亚波长子周期, 为波长量级, 通常情况满足关系式  $\Delta \leq \lambda/2n_s$ ;  $g_m = g(\Delta m)$ , 为  $g(r)$  在采样点  $r = \Delta m$  处的值, 根据等效介质理论,  $g(r)$  可表示为

对于 TE 偏振

$$g(r) = (n_{\text{eff}}^2(r) - 1) / [n_s^2 - 1] \quad (6a)$$

对于 TM 偏振

$$g(r) = (n_{\text{eff}}^{-2}(r) - 1) / [n_s^{-2} - 1] \quad (6b)$$

将式(3)代入式(6a)或(6b), 即可求出对应的  $g(r)$ .

## 2 设计结果与分析

应用上述方法设计了连续浮雕微透镜和与其等效的二元亚波长衍射微透镜, 如图1所示. 所有微

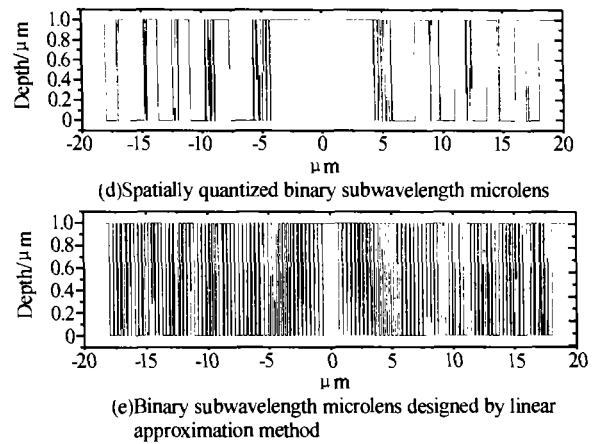
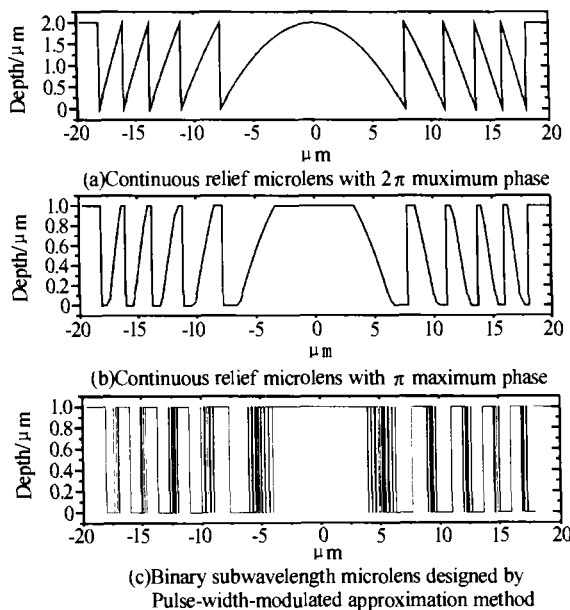
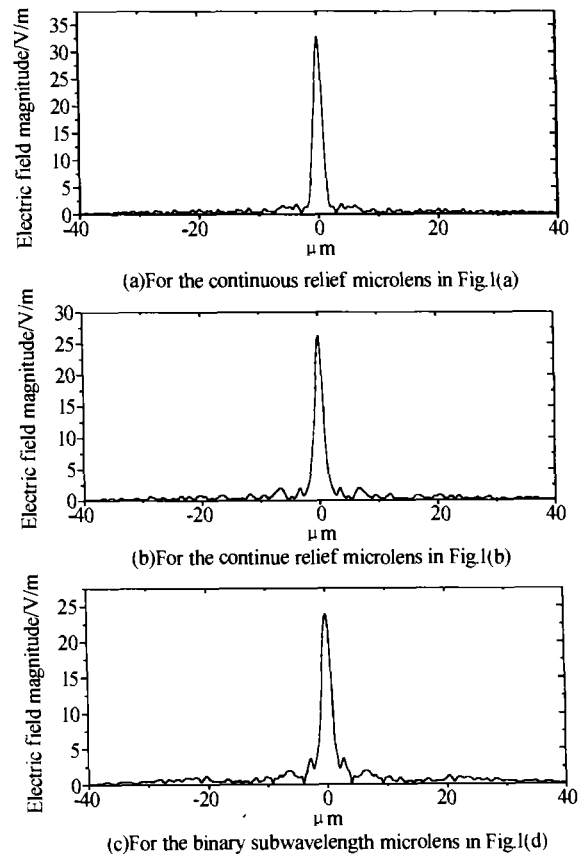


图1 不同结构的微透镜

Fig. 1 Microlenses with difference structure

透镜的共同设计参量是: 直径为  $36.06 \mu\text{m}$ , 焦距为  $30 \mu\text{m}$ , 波长为  $1 \mu\text{m}$ , 基底材料为  $\text{SiO}_2$  ( $n_s = 1.5$ ), 波带数为 5.

为了检验二元亚波长微透镜对连续浮雕微透镜的等效效果, 需要对设计出的元件进行分析. 由于亚波长衍射光学元件的特征尺寸小于入射波长, 因此, 必须采用严格的矢量衍射分析方法. 本文采用旋转体时域有限差分法<sup>[9]</sup>对设计的元件进行了分析, 给出了各元件在焦平面的电场强度分布, 如图2所示. 分析中入射波为垂直入射的平面波, 且为 TE 偏振, 入射波长为  $1 \mu\text{m}$ .



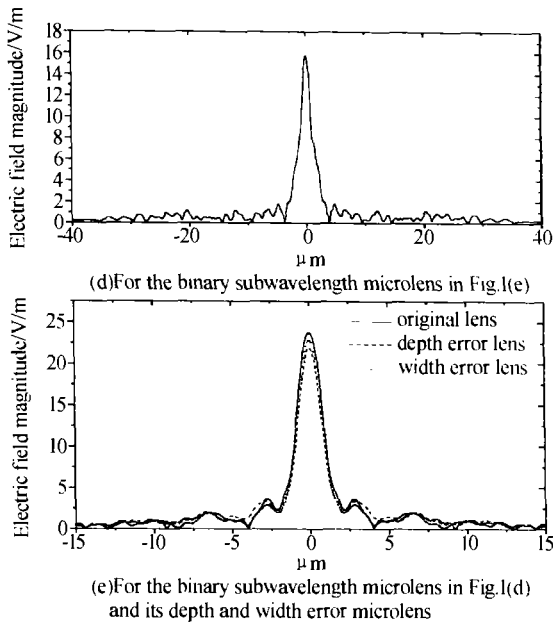


图2 微透镜在焦平面的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution on focal plane of microlenses

图1(a)为 $2\pi$ 连续相位分布的连续浮雕微透镜,对应的最大相位为 $2\pi$ ,刻蚀深度 $d$ 为 $2\ \mu\text{m}$ .焦平面电场强度分布如图2(a)所示.

减小最大相位会减小刻蚀深度,从而降低制作难度.图1(b)是把最大相位减小为 $\pi$ ,刻蚀深度变为 $1\ \mu\text{m}$ 的连续浮雕微透镜,它在焦平面处的场强分布如图2(b)所示.

图1(c)是采用脉冲宽度调制法,根据式(5)设计的二元亚波长微透镜,刻蚀深度为 $1\ \mu\text{m}$ ,亚波长子周期 $\Delta$ 为 $1/3\ \mu\text{m}$ ,最小特征尺寸为 $0.02\ \mu\text{m}$ .它的渐变等效折射率如图3所示.它等效微透镜图1(b),即图1(c)与图1(b)所示的两个微透镜会产生相同的相位变化.由于元件的最小特征尺寸受制作工艺水平的限制,需要对图1(c)所示的微透镜进行空间量化,把最小特征尺寸增大为 $0.1\ \mu\text{m}$ 后的微透镜如图1(d)所示,它在焦平面处的场强分布如图2(c)所示.对比图2(c)和图2(b)所示的分析结果,可以看出微透镜图1(d)对微透镜图1(b)有很好的等效作用.

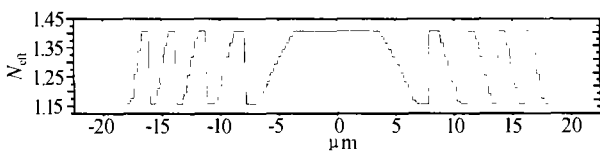


图3 图1(c)中二元亚波长微透镜的等效折射率分布

Fig. 3 The effective index of the binary subwavelength microlens in Fig. 1(c)

图1(e)是对填充因子进行线性近似<sup>[10]</sup>设计的二元亚波长微透镜,其最小特征尺寸为 $0.05\ \mu\text{m}$ ,它在焦平面处的场强分布如图2(d)所示.对比分析结果可以看出,微透镜图1(d)对光能的会聚作用要

比微透镜图1(e)好,说明填充因子的脉冲宽度调制法要优于填充因子的线性近似法.

在微透镜的制作过程中会存在一定的制作误差,例如深度误差和宽度误差等,图2(e)给出了以上两种误差对微透镜图1(d)聚光能力的影响.先考虑只存在深度误差的微透镜,设其刻蚀深度为 $0.9\ \mu\text{m}$ ,即产生10%的深度误差;再考虑宽度误差的影响,假设产生了 $30\ \text{nm}$ 即30%的宽度误差,其最小特征尺寸增加为 $0.13\ \mu\text{m}$ .分析结果如图1(e)中所示,可以看出在相对误差不算太大时,深度误差和宽度误差对微透镜聚光能力的影响不大.

### 3 结论

本文给出了亚波长微透镜的设计方法.首先设计了连续浮雕微透镜,然后结合标量衍射理论与等效介质理论,重点说明了采用脉冲宽度调制法来确定二元亚波长微透镜填充因子的设计方法.由于元件的最小特征尺寸受制作工艺水平的限制,对采用脉冲宽度调制法设计的二元亚波长微透镜进行了空间量化,并与采用填充因子的线性近似法设计出的二元亚波长衍射微透镜做了对比.为了检验二元亚波长微透镜对连续浮雕微透镜的等效效果和制作误差对微透镜聚焦能力的影响,采用旋转体时域有限差分法对设计出的微透镜进行了分析,给出了各元件在焦平面的电场强度分布.分析结果表明,本文设计的二元亚波长微透镜对连续浮雕微透镜有很好的等效效果;填充因子的脉冲宽度调制法要优于填充因子的线性近似法;制作相对误差不大时,深度误差和宽度误差对微透镜聚光能力的影响不大.

### 参考文献

- Gale M T, Rossi M, Pedersen J, et al. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists. *Opt Eng*, 1994, **33** (11): 3556 ~ 3566
- Ferstl M, Kuhlow B, Pawlowski E. Effect of fabrication errors on multilevel fresnel zone lenses. *Opt Eng*, 1994, **33** (04): 1229 ~ 1235
- 曹召良,陆广,等.亚微米尺寸元件的离子束刻蚀制作. *光子学报*, 2003, **32** (6): 653 ~ 656  
Chao Z L, Lu G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32** (6): 653 ~ 656
- Mait J N, Scherer A, et al. Diffractive lens fabricated with binary features less than  $60\ \text{nm}$ . *Opt Lett*, 2000, **25** (6): 381 ~ 383
- Nishihara H, Suhara T. Micro Fresnel lenses. *Progress in Optics XXIV*, Wolf, 1987. 3 ~ 37
- 杜春雷,周礼书,邱传凯,等.衍射微透镜列阵的研究与

- 应用. 光学技术, 1998, **131**(3): 17 ~ 19
- Du C L, Zhou L S, Qiu C K, *et al.* *Optical Technology*, 1998, **131**(3): 17 ~ 19
- 7 Mait J N, Prather D W, Mirotznik M S. Binary subwavelength diffractive -lens design. *Optics Letters*, 1998, **23**(9): 1343 ~ 1345
- 8 Mait J N, Prather D W, Mirotznik M S. Design of binary subwavelength diffractive lenses by use of zeroth-order effective-medium theory. *J O S A(A)*, 1999, **16**(5): 1157 ~ 1167
- 9 Prather D W, Shi Shouyuan. Formulation and application of the FDTD method for the analysis of axially symmetric diffractive optical elements. *JOSA(A)*, 1999, **16**(5): 1131 ~ 1143
- 10 Prather D W, Mait J N, Mirotznik M S, *et al.* Vector-based synthesis of finite aperiodic subwavelength diffractive optical elements. *J O S A(A)*, 1998, **15**(6): 1599 ~ 1607

## Design of Subwavelength Diffractive Microlens

Liu Yuling, Lu Zhenwu, Ren Zhibin, Li Fengyou, Cao Zhaoliang, Sun Qiang

*State Key Laboratory of Applied Optic, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022, China*

Received date: 2003-02-24

**Abstract** The design procedure of subwavelength diffractive microlenses was presented based on the combination of scalar diffractive theory and effective medium theory. As examples continuous-relief microlenses and their counterparts of binary subwavelength diffractive microlenses were designed with computer code. Pulse-width-modulated approximation and linear approximation were employed to determine the width of subwavelength features. Body-of-revolutionary finite-difference time-domain method was used for the analysis of the designed microlenses to test whether the binary subwavelength profile can achieve effects similar to continuous-relief profile and effect of fabrication error on microlens ability of focusing optical energy. The electric field distributions on the focal planes of designed microlenses were illustrated. The numerical results showed that the designed binary subwavelength microlenses have nearly equal ability of focusing optical energy with the continuous-relief microlenses they simulated, the pulse-width-modulated approximation method has better efficiency than the linear approximation method, and the fabrication depth error and width error have little effect on microlens efficiency of focusing optical energy when the relative error is small.

**Keywords** Subwavelength; Diffractive; Microlens; Finite-difference time-domain method



**Lu Yuling** is pursuing her Ph. D. in State Key Laboratory of Applied Optic in CIOMP, Chinese Academy of Sciences. Her research interests include design, analysis and fabrication of subwavelength diffractive optical elements, vector analysis, finite-difference time-domain method, and field propagation algorithm.