

衍射光学透镜的设计

沈忙作

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610041)

摘 要 介绍一种衍射光学透镜的通用设计方法, 它适用于大的相对孔径和任意的物像共轭距离, 同时考虑了透镜基板厚度的影响. 设计的结果, 用激光写入法加工成透镜, 其成像质量达到衍射极限.

关键词 衍射光学, 光学设计.

1 引 言

近年来, 衍射光学元件发展迅速, 在光计算、光学耦合、光通讯、光学信号处理及微型光学系统等方面有很大的应用前景. 由于这种光学元件往往很小, 经常属于微细光学范围. 如果元件表面起伏是分层的, 又称为二元光学. 大多数衍射透镜是无限远共轭的, 而且相对孔径都不大. 文献[1], 文献[2]论述了衍射透镜的设计原理及性能评价, 但缺少有限共轭距的分析, 或没有顾及透镜基板厚度的影响. 本文介绍一种严格的衍射透镜设计方法, 它适用于大的相对孔径, 任意的物像共轭距离. 为了验证设计的结果, 一个设计的例子, 用激光写入法加工成透镜, 其像质达到衍射极限.

2 单个衍射透镜的高斯光学

图1表示单个衍射透镜的几何关系. 其中 O 为物点, O' 为像点. d 为衍射透镜基板厚度, 基板折射率为 n_s , n_d 为衍射层的折射率. 其余符号与一般光学系统相同. 应当指出, 衍射透镜基板厚度的影响只有在物距 L 无穷大时才可以忽略.

在近轴区高斯光学范围里, 正弦与正切可以用角度值代替, 从而衍射层的半径 r (光线在衍射层上的高度)可表示为:

$$r = L'U' = LU + dU', \quad (1)$$

由于 $I = U$, $I' = I/n_s$ (折射定律), 故有

$$r = L'U' = (L + d/n_s)U, \quad (2)$$

(2)式意味着带基板的衍射透镜可看作是位于衍射层面上的一个薄透镜, 其物距为 $L + d/n_s$, 像距为 L' , 如图2所示.

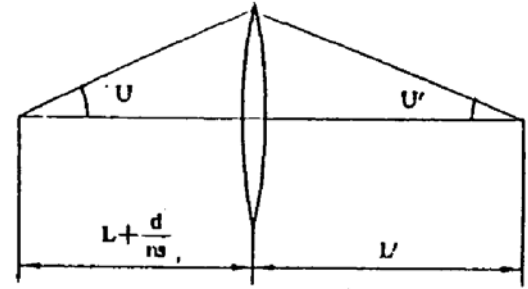
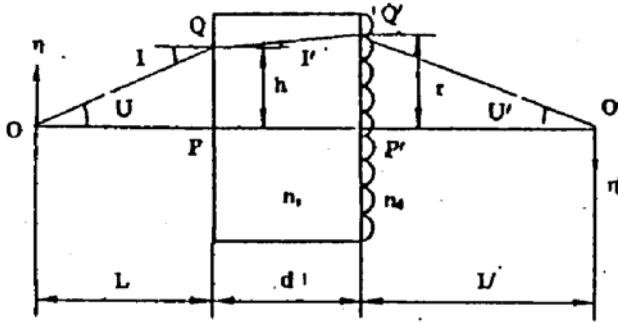


Fig. 1 The geometry of a single diffraction lens in air

Fig. 2 The thin lens model of diffraction lens

从拉格朗日不变量, 导出空气中衍射透镜的放大率为:

$$M = \frac{\eta'}{\eta} = \frac{U}{U'} = \frac{L'}{L + d/n_s} \quad (3)$$

如果引入焦距的概念, 当焦距为 f' 时, 衍射透镜同样满足高斯光学物像距公式

$$\frac{1}{L + d/n_s} + \frac{1}{L'} = \frac{1}{f'} \quad (4)$$

3 衍射透镜的设计

衍射透镜设计的目的乃是在图 1 给定和成像关系条件下, 确定透镜衍射层的表面起伏对于透镜半径坐标 r 的关系. 如果没有衍射层, 孔径角为 U 的孔径光线从物点 O 到像点 O' 的光线路径是 $OQ'Q'O'$, 它将比沿轴光线 $OPP'O'$ 要长. 即光程差 Λ 大于零,

$$\Lambda = (OQ - OP) + n_s(QQ' - PP') + (Q'O' - P'O'). \quad (5)$$

根据费马原理, 要得到 O 的完善像 O' , 所有成像光线之间的光程差应该为零. 或者, 在衍射透镜的情况下, 成像光线之间的光程差应是波长的整数倍. 为此, (5) 式所表示的光程差应该由衍射层补偿. 这样, 衍射透镜的设计便可分解成两个步骤:

- 1) 对于给定的成像几何条件, 计算不同透镜半径 r 处的光程差 $\Lambda(r)$.
- 2) 确定衍射层厚度 $H(r)$:

$$H(r) = \frac{m\lambda - [\Lambda(r) \text{ Mod } m\lambda]}{n_s - 1} \quad (6)$$

式中 λ 为工作波长. m 为一个大于零的整数, 称为相位匹配因子^[3], 它就是在衍射层环带边界上光程差跳变的波长数目. 经常, $m = 1$. m 也可以大于 1, 甚至在不同半径处取不同的值, 为的是减少衍射层上环带的数目, 便于加工和减小环带交界处加工不精确的影响.

在近轴区内 轴外光线与轴上光线的光程差可以用光线孔径的二次函数表示. 对于图 1 的一般情况, 在半径 r 处的光程差近似表达式为

$$\Lambda(r) = \frac{r^2}{2(L + d/n_s)} + \frac{r^2}{2L'} = \frac{r^2}{2f'} \quad (7)$$

因为是在近轴区, 只要透镜焦距 f' 一定, 透镜形状实际上与共轭距离无关, 这时衍射层具有抛物线的轮廓. 在相对孔径非常小的场合, 衍射层的轮廓甚至可以用球面近似, 此时球半径 R 为:

$$R = (n_s - 1)f'. \quad (8)$$

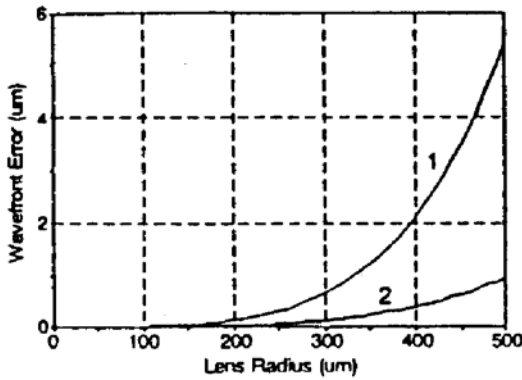


Fig. 3 Design errors of (1) spherical and (2) parabolic approximation

显然, 球面和抛物面近似都只适用于小的相对口径. 一个焦距为 $f' = 2 \text{ mm}$ 的衍射透镜, 当物距 $L = \infty$ 时, 近似误差随透镜半径变化的情况如图 3 所示. 显然, 相对口径大, 必须用严格的方法计算光程差.

在非近轴区 从图 1 可知, 严格的光程差应是:

$$A(r) = L[(1/\cos v) - 1] + n_s d[(1/\cos I') - 1] + L'[(1/\cos U') - 1]. \quad (9)$$

当半径 r 一定时, 角度值 U 、 I' 、 U' 由下面方程组决定

$$\left. \begin{aligned} n_s \sin I' &= \sin I \\ r &= L \tan U + d \tan I' \\ r &= L' \tan U' \\ I &= U \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

因为(10)式没有解析解, 在设计时, 对于一系列的 r 值, 在计算机上用迭代法求出(10)式的解 U 、 I' 和 U' . 然后, 用(9)式计算光程差, 用(6)式求出对应 r 处的衍射层起伏量.

用严格的光程差算法, 设计了一个大相对口径的微型衍射透镜. 其参数是: $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, $d = 1000 \mu\text{m}$, $n_s = 1.51$, $n_o = 1.564$, (光学树脂 epo-tek 301-2), $L = 842 \mu\text{m}$ (基板处在会聚光束中), $L' = \infty$, $f' = 1504 \mu\text{m}$, $2r_{\max} = 750 \mu\text{m}$, F 数为 2, $m_s = 2$. 这时, 衍射层上最大的光程变化是 2λ , 衍射层表面起伏的最大值为 $2\lambda/(n_s - 1) = 2.24 \mu\text{m}$. 计算机设计所得的衍射透镜衍射层的断面形状如图 4 所示, 整个透镜上共有 36 个环带.

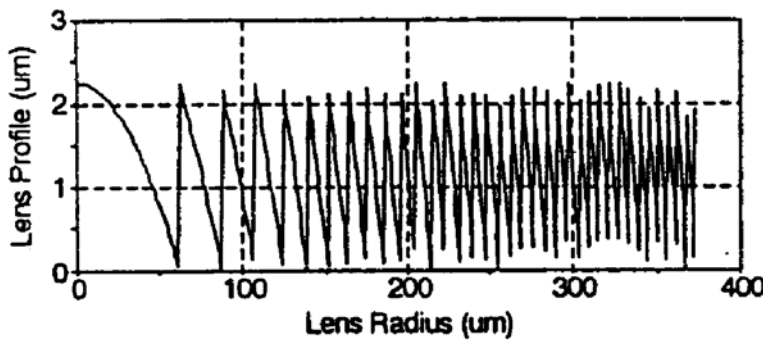


Fig. 4 The profile of a diffraction lens

由于采用了严格的算法, 限制衍射透镜口径的不再是计算方法, 而是加工工艺条件, 工艺条件决定了最边缘最窄环带所能达到的宽度. 本例中, 最外缘环带宽度是 $5 \mu\text{m}$, 与所采用的加工方法相适应.

4 衍射透镜的制作与检测

上节设计的衍射透镜用激光写入法^[4]加工. 波长为 $0.442 \mu\text{m}$ 的 He-Cd 激光由显微物镜会聚成直径为 $1.5 \mu\text{m}$ 的小光点, 涂有光敏树脂的透镜基板固定在一个 XY 工作台上作二维扫描运动, 激光强度根据工作台的位置作相应的调制, 扫描完毕后, 将已感光的光敏树脂显

影, 便获得所需要的表面起伏. 图 5 是衍射透镜的局部显微照片, 从图中可以看到, 透镜上的环带结构以及激光扫描的痕迹. 检测上述衍射透镜时, 将它置于准直的 He-Ne 激光束中, 衍射层朝向光束. 在基板一方用一个带显微物镜的 CCD 摄象机观察测量聚焦光斑, 显微镜的数值孔径要大于衍射透镜的数值孔径. 图 6 是记录下的光斑形状. 测量结果表明, 聚焦光斑的第一暗环直径比理论衍射斑第一暗环直径大 7%, 透镜的衍射效率 70%.

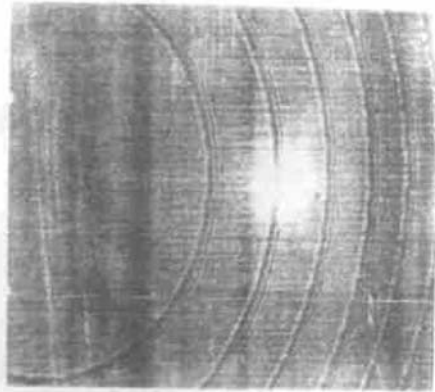


Fig. 5 Microscopic photo of the diffraction lens



Fig. 6 The focus spot of the diffraction lens

本文的工作得到瑞士 Paul-Scherrer Institute Zurich 的 M. T. Gale 先生及其它同事的帮助, 谨致谢意.

参 考 文 献

- [1] D. A. Buralli, G. M. Morris, J. R. Rogers, Optical performance of holographic kinoforms. *Appl. Opt.*, 1989, 25 (5) : 976~983
- [2] D. A. Buralli, G. M. Morris, Design of diffractive singlets for monochromatic imaging. *Appl. Opt.*, 1991, 30 (16) : 2151~2158
- [3] R. E. Kunz, M. Rossi, Phase-matched fresnel elements. *Opt. Commun.*, 1993, 97(1/2) : 6~10
- [4] M. T. Gale, G. M. Lang, J. M. Raynor *et al.*, Fabrication of microoptical components by laser beam writing in photoresist. *Proc. SPIE*, 1991, 1506 : 65~70

Design of Diffraction Lenses

Shen Mangzuo

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Chengdu 610041)

(Received 26 July 1993; revised 20 October 1993)

Abstract A general method for designing diffraction lenses is presented. It is adoptable to the diffraction lenses with large relative aperture and arbitrary conjugate distance while the effect of the substrate thickness is taken into consideration. A lens thus designed was fabricated by a laser writing system and the diffraction limit quality was obtained.

Key words diffraction optics, optical design.