

文章编号 1004-924X(2000)01-0011-05

对准误差对菲涅耳透镜衍射效率的影响

李红军, 卢振武, 廖江红, 翁志成

(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, 吉林 长春 130021)

摘要: 基于标量衍射理论, 在傅立叶光学的基础上, 首先得出存在对准误差情况下4阶菲涅耳透镜衍射效率的解析式; 并以4阶、8阶、16阶菲涅耳透镜为例, 系统分析对准误差对衍射效率的影响并进行计算机模拟研究。模拟计算结果对正在进行的16阶菲涅耳透镜制作工作提供了理论指导。

关键词: 二元光学元件; 菲涅耳透镜; 对准误差; 计算机模拟

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

1 引言

传统的二元光学元件制作采用多次掩模套刻加工工艺, 理论上, 8阶二元光学元件的衍射效率达95%, 16阶二元光学元件的衍射效率可达99%。但在制作过程中, 由于制作误差的影响, 往往不能得到较高的衍射效率。制作过程中的主要误差可分为刻蚀深度误差和掩模对准误差。一些文献^[1-5]分析了各种误差对二元光学器件的影响, 指出对准误差对衍射效率的影响较大。在多阶菲涅耳透镜的制作过程中, 存在多次对准过程, 对准误差比较复杂。本文在傅立叶光学的基础上, 分别讨论4阶、8阶、16阶菲涅耳透镜制作过程中对准误差对衍射效率的影响, 并给出计算机

模拟结果。通过这些分析研究, 得出对准误差对衍射效率影响的系统规律, 这对实际制作菲涅耳透镜及其他二元光学元件具有重要的指导意义。

2 4阶菲涅耳透镜的衍射效率

无掩模对准误差的多阶菲涅耳透镜位相分布呈圆对称分布, 当出现对准误差之后, 元件的实际位相分布不再对称而且很难描述, 如图1(a)。对于菲涅耳透镜, $T \ll r$ (r 为菲涅耳透镜主环带半径), 可将1(a)所示的对准误差近似用图1(b)所示的圆对称误差来表示^[4], 两者关系为

$$2\pi r \Delta d = 2r \Delta T, \Delta d = \Delta T / \pi \quad (1)$$

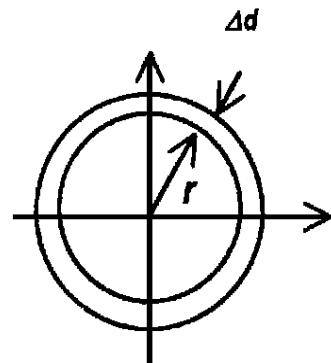
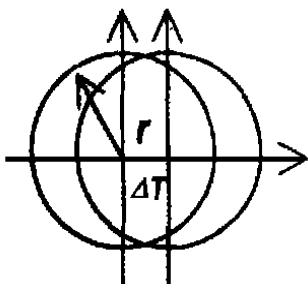


Fig 1(a) Actual distribution of alignment errors

Fig 1(b) Equivalent distribution of alignment errors

为了分析方便, 设 $a_j - 1 = \Delta d_{j-1} / \Delta_j$, $j = 2, 3, 4$, Δ_j 为掩模 j 的相邻次环带的间隔(第一个掩模没有对准误差, 所以 j 从 2 开始)。此外, 设当

掩模 j 相对掩模 $j - 1$ 向右平移时, $a_j > 0$; 反之, 当掩模 j 相对掩模 $j - 1$ 向左平移时, $a_j < 0$ 。

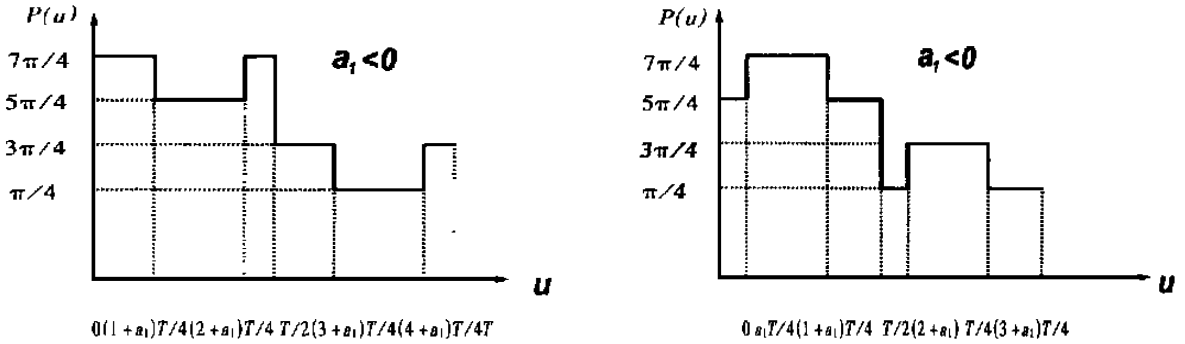


Fig 2 Phase modulation function of 4-step Fresnel lens with alignment errors

根据标量衍射理论, 假设单位振幅平面波垂直入射到 4 台阶菲涅耳透镜上, 根据前面的简化处理, 菲涅耳透镜可以认为是一个周期为 T 的结构, M 级衍射的复振幅分布^[5]

$$c_m = \frac{1}{T} \int_0^T P(u) \exp(-i2m\pi u/T) du \quad (2)$$

这里 $P(u)$ 是通过一定表面轮廓的位相调制。对于 4 台阶菲涅耳透镜, $a_1 < 0$ 和 $a_1 > 0$ 时一个周期的位相调制函数如图 2 所示。根据 (2) 式, 其 -1 级衍射光波的复振幅 c_{-1} 如下, 当 $-1 < a_1 < 0$ 时

$$\begin{aligned} c_{-1} = & \frac{1}{T} \left[\exp(i7\pi/4) \int_0^{(1+a_1)T/4} \exp(i2\pi u/T) du + \right. \\ & \exp(i5\pi/4) \int_{(1+a_1)T/4}^{(2+a_1)T/4} \exp(i2\pi u/T) du + \\ & \exp(i7\pi/4) \int_{(2+a_1)T/4}^{T/2} \exp(i2\pi u/T) du + \\ & \exp(i3\pi/4) \int_{T/2}^{(3+a_1)T/4} \exp(i2\pi u/T) du + \\ & \exp(i\pi/4) \int_{(3+a_1)T/4}^{(4+a_1)T/4} \exp(i2\pi u/T) du + \\ & \left. \exp(i3\pi/4) \int_{(4+a_1)T/4}^T \exp(i2\pi u/T) du \right] \\ = & \dots \\ = & \frac{2\sqrt{2}}{\pi} [1 + \sin(\pi a_1/2)]^{1/2} \exp(i\pi a_1/4) \quad (3) \end{aligned}$$

同理, 当 $0 < a_1 < 1$ 时

$$c_{-1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} [1 - \sin(\pi a_1/2)]^{1/2} \exp(i\pi a_1/4) \quad (4)$$

当 $-1 < a_1 < 1$ 时, 方程 (3) 和方程 (4) 可以表示为

$$c_{-1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} [1 - \sin(\pi |a_1|/2)]^{1/2} \exp(i\pi a_1/4) \quad (5)$$

则 4 台阶菲涅耳透镜的衍射效率 η 可以表示为

$$\eta = |c_{-1}|^2 = \frac{8}{\pi} (1 - \sin(\pi |a_1|/2)) \quad (6)$$

当 $a_1 = 0$ 时, $\eta = 81\%$, 为理想情况下 4 阶菲涅耳透镜的衍射效率。衍射效率 η 与 a_1 的关系曲线如图 (3) 所示。其具有如下规律:

- 1) 衍射效率随对准误差绝对值的增加而增加, 与对准误差的偏向无关;
- 2) 衍射效率随对准误差绝对值的增加基本上呈线性减少趋势。

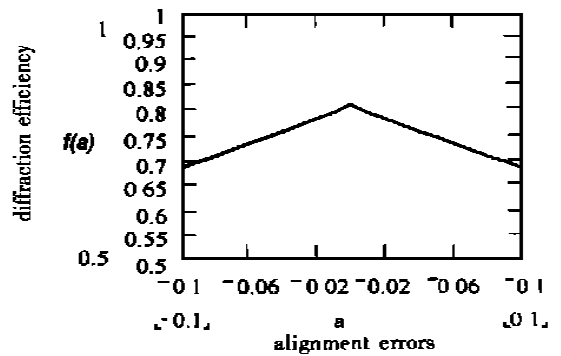


Fig 3 Relation between D. E and alignment errors a_1

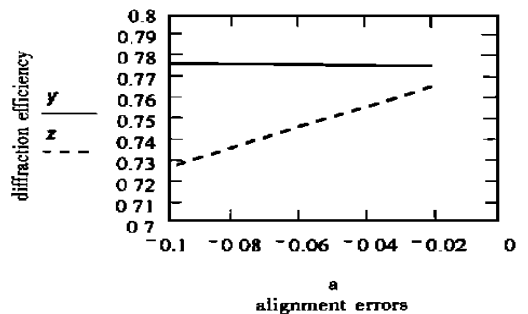


Fig 4 Relation between D. E and alignment errors a_2

3 8 台阶菲涅耳透镜的衍射效率

在 8 台阶菲涅耳透镜制作过程中, 有可能产生两次对准误差, 即掩模 2 与掩模 1 之间的对准误差 a_1 和掩模 3 与掩模 2 之间的对准误差 a_2 , 它们对衍射效率的影响与 a_1 和 a_2 的大小及偏向都有关, 情况比较复杂。表 1 和图 4 是一些有代表性的结果。

表 1 部分对准误差及相应的衍射效率

Table 1 The parts of the alignment errors and corresponding D. E

a_1	a_2	D. E (%)	a_1	a_2	D. E (%)	a_1	a_2	D. E (%)	a_1	a_2	D. E (%)
- 0.02	- 0.02	91.4	0.02	0.02	91.4	- 0.02	0.02	90.7	0.02	- 0.02	90.3
- 0.04	- 0.02	87.8	0.04	0.02	87.8	- 0.04	0.02	87.1	0.04	- 0.02	86.8
- 0.06	- 0.02	84.4	0.06	0.02	84.4	- 0.06	0.02	83.5	0.06	- 0.02	83.3
- 0.1	- 0.02	77.5	0.1	0.02	77.5	- 0.08	0.02	80	0.08	- 0.02	79.9
- 0.1	- 0.06	77.6	0.1	0.06	77.6	- 0.1	0.02	76.5	0.1	- 0.02	76.3

由表 1 及图 4 可以得出如下规律:

- 1) 对准误差 a_1 对衍射效率的影响比较大, 当 $a_2 = - 0.02$, a_1 从 $- 0.02$ 减少到 $- 0.1$ 时, 衍射效率下降 13.9%。
- 2) 当 a_1 和 a_2 同时偏左或偏右时, 对准误差绝对值相同则衍射效率相同。如 $a_1 = - 0.02$, $a_2 = - 0.02$ 时, 衍射效率为 91.4%; $a_1 = 0.02$, $a_2 = 0.02$ 时, 衍射效率为 91.4%。
- 3) 在 a_1 偏左, a_2 偏右及 a_1 偏右, a_2 偏左两种情况下, $|a_2|$ 保持不变, 衍射效率随 $|a_1|$ 的变化规律基本相同。
- 4) 对准误差 a_2 对衍射效率的影响比较小, 当 $a_1 = - 0.1$ 时, a_2 从 $- 0.02$ 变化到 $- 0.1$, 衍射效率下降 0.1%, 当 $a_1 = 0.1$ 时, a_2 从 $- 0.02$ 变化到 $- 0.1$, 衍射效率下降 3.9%。

4 16 台阶菲涅耳透镜的衍射效率

在 16 台阶菲涅耳透镜的制作过程中, 可能产生三次对准误差, 除 a_1 和 a_2 外, 还有掩模 4 与掩模 3 之间的对准误差 a_3 。每次对准都有偏左和偏右两种情况, 对准误差对衍射效率的影响更复杂。下面是一些有代表性的数据及由此得出的规律。

Table 2 Relation between D. E and a_1, a_2, a_3

a_1	a_2	a_3	D. E (%)	down to (%)
- 0.05	0.05	0	86.5	
- 0.05	0.05	- 0.1	85.7	0.8
- 0.05	0	- 0.05	88.8	
- 0.05	0.1	- 0.05	83.4	5.4
0	0.05	- 0.05	95.5	
- 0.1	0.05	- 0.05	77.1	18.4

从表 2 中得出如下规律:

- 1) 衍射效率随 a_1 变化比较大, 随 a_2 变化次之, 随 a_3 变化最小。

Table 3 Two cases of the relation between D. E and alignment errors

a_1	a_2	a_3	D. E (%)	down to (%)
- 0.05	0	0.05	88.7	
- 0.05	0.1	0.05	83.3	5.4
0	0.05	0.05	95.4	
- 0.1	0.05	0.05	77	18.4
0.05	0	- 0.05	88.7	
0.05	- 0.1	- 0.05	83.3	5.4
0	- 0.05	- 0.05	95.4	
0.1	- 0.05	- 0.05	77	18.4

从表 3 可以得出如下规律:

- 2) 对准误差 a_1 偏左, a_2 偏右, a_3 偏右与 a_1 偏右, a_2 偏左, a_3 偏左两种情况下, 对准误差对衍射效率的影响完全相同, 这与 8 台阶时得到的规律一致。这是由于菲涅耳透镜的对称结构决定的。

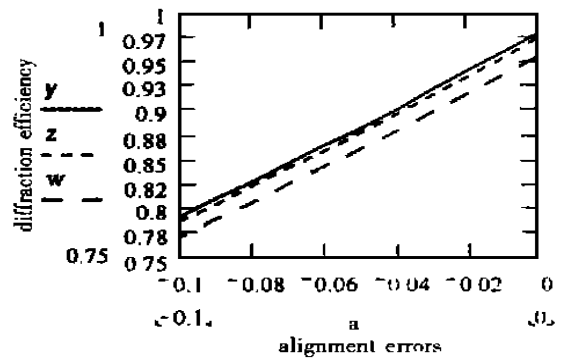


Fig. 5 Relation between D. E and alignment errors $a_1 < 0$

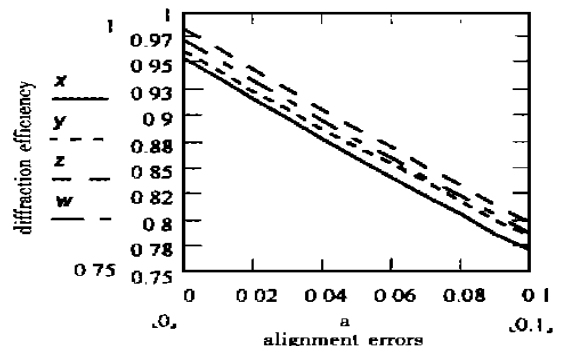


Fig. 6 Relation between D. E and alignment errors $a_1 > 0$

图 5 中的 y 曲线是 $a_2 = - 0.05$, $a_3 = - 0.05$

时衍射效率随 a_1 的变化曲线; z 曲线是 $a_2 = -0.05$, $a_3 = 0.05$ 时衍射效率随 a_1 的变化曲线; w 曲线是 $a_2 = 0.05$, $a_3 = -0.05$ 时衍射效率随 a_1 的变化曲线。图 6 中的 x 曲线是 $a_2 = -0.05$, $a_3 = -0.05$ 时衍射效率随 a_1 的变化曲线; y 曲线是 $a_2 = -0.05$, $a_3 = 0.05$ 时衍射效率随 a_1 的变化曲线; z 曲线是 $a_2 = 0.05$, $a_3 = 0.05$ 时衍射效率随 a_1 的变化曲线; w 曲线是 $a_2 = 0.05$, $a_3 = -0.05$ 时衍射效率随 a_1 的变化曲线; 从中可以发现:

3) 当 a_2 及 a_3 都偏左时, 衍射效率比较大且随 a_1 的变化较小, 当 a_2 偏右, a_3 偏左时, 衍射效率较小且随 a_1 的变化较大。

4) 当 a_2 及 a_3 都偏右时, 衍射效率比较大且随 a_1 的变化较小, 当 a_2 及 a_3 都偏左时, 衍射效率比较小且随 a_1 的变化较大。

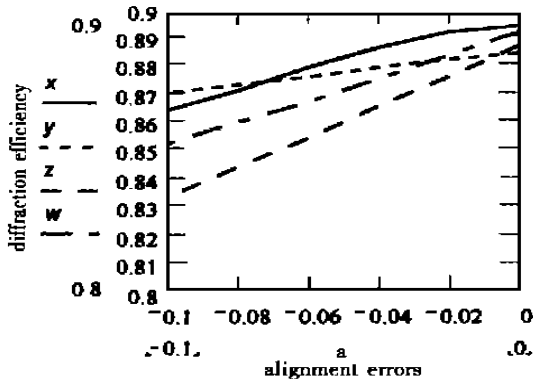


Fig. 7 Relation between D. E and alignment errors a_2

图 7 中 x 曲线是 $a_1 = -0.05$, $a_3 = -0.05$ 时衍射效率随 a_2 的变化曲线; y 曲线是 $a_1 = -0.05$, $a_3 = 0.05$ 时衍射效率随 a_2 的变化曲线; z 曲线是 $a_1 = 0.05$, $a_3 = -0.05$ 时衍射效率随 a_2 的变化曲线; w 曲线是 $a_1 = 0.05$, $a_3 = 0.05$ 时衍射效率随 a_2 的变化曲线; 可以看出: 5) 当 $a_2 = -0.07$

时, a_1, a_3 均偏左时, 衍射效率比较大。当 $a_2 = -0.07$ 时, a_1 偏左, a_3 偏右时, 衍射效率比较大; 当 a_1 偏右, a_3 偏左时, 衍射效率比较小。

5 结 束 语

本文从标量衍射理论出发, 在傅立叶光学的基础上, 分析了对准误差对多台阶菲涅耳透镜衍射效率的影响。通过大量的模拟计算, 得出一些对多阶菲涅耳透镜制作具有指导性的结论:

1) a_1 对衍射效率的影响比较大, $|a_1|$ 越大衍射效率越小, 对于 4 台阶和 8 台阶菲涅耳透镜, a_1 的偏向基本上不影响衍射效率。实际制作过程中, 应尽量减少第一次套刻时的对准误差。

2) 对于 16 台阶菲涅耳透镜, 当 a_1 偏左, a_2 偏右, a_3 偏左或当 a_1 偏右, a_2 和 a_3 都偏左时, 衍射效率随 a_1 的变化下降的较快, 衍射效率比较小, 实际制作过程中应尽量避免这两种情况出现。而当 a_1 偏左, a_2 偏左, a_3 偏左或 a_1 偏右, a_2 偏右, a_3 偏右时, 衍射效率随 a_1 的变化下降的较快, 衍射效率比较大, 实际制作过程中应尽量保证。

3) 当 a_2 偏左, a_1 偏右, a_3 偏左时, 衍射效率随 a_2 的变化下降的较快, 衍射效率比较小, 实际制作过程中应尽量避免这种情况。当 $a_2 = -0.07$ 时, a_1, a_3 均偏左时, 衍射效率比较大; 当 $a_2 = -0.07$ 时, a_1 偏左, a_3 偏右时, 衍射效率比较大, 实际制作过程中应尽量保证。

上述结论对正在进行的 16 台阶菲涅耳透镜的制作提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 谈苏庆等 二元光学元件制作误差的振幅矢量分析法[J]. 激光技术, 1996, 20(5): 308~ 311
- [2] 赵光兴等 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
- [3] 徐平等 二元光学元件制作误差的分析与模拟[J]. 光学学报, 1996, 16(6): 833~ 838
- [4] 郑哲等 对准误差对二元光学器件衍射效率的影响[J]. 光电子·激光, 1997, 8(4): 241~ 245
- [5] Yasuyuki Ueno. Point-spread function for binary diffractive lenses fabricated with misaligned masks[J]. Applied Optics, 1998, 37(16): 3401~ 3407.

Effect of alignment error on Fresnel lens

LI Hong-jun, LU Zhen-wu, LAO Jiang-hong, WENG Zhi-cheng

*(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)*

Abstract: Based on the theory of scalar diffraction and on the Fourier optics, a formula of the diffractive efficiency with alignment error for the 4 step Fresnel lens is obtained. Taking 4-step and 8-step and 16-step Fresnel lens for example, the effect of alignment error on diffractive efficiency is analyzed systematically and simulated by computer. The results of computer simulation can provide theoretical basis for the fabrication of 16-step Fresnel lens.

Key words: binary optical element; Fresnel lens; alignment error; computer simulation

作者简介: 李红军(1972-),男,黑龙江庆安人,长春光机所在读博士,主要研究兴趣包括二元光学元件的设计制作、光刻技术和离子束加工技术。E-mail 地址: hongjunli@263.net