

二元光学元件制作误差的振幅矢量分析法*

谈苏庆** 周进 高文琦
(南京大学物理系, 南京, 210093)

摘要: 本文用振幅矢量法分析二元光学元件的制作误差对衍射效率的影响, 以四位相台阶光栅为例导出了衍射效率与对位误差、刻蚀深度误差的解析式并进行了讨论。整个处理方法对 2^n 位相台阶的二元光学元件具有普遍意义。

关键词: 振幅矢量法 二元光学元件 制作误差 衍射效率

Amplitude vector analytics of binary optical element fabrication errors

Tan Suqing, Zhou Jin, Gao Wenqi
(Department of Physics, Nanjing University)

Abstract: This paper analyses the fabrication errors of binary optical elements exerting an influence on diffraction efficiency through amplitude vector analytics. In terms of the four-level element, the analytical formula about the diffraction efficiency, aim error and the error of etching depth is deduced and discussed. This method has the universal sense for 2^n -level binary optical elements.

Key words: amplitude vector method binary optical element fabrication errors diffraction efficiency

一、引言

二元光学是 80 年代中期发展起来的一个新的光学分支^[1~2]。二元光学基于光波的衍射原理, 采用计算机辅助设计和微电子工艺相结合的方法研制新型光学元件, 它具有传统光学元件不可比拟的优点, 如衍射效率高, 对灵巧设计的容纳度大, 微型化和轻型化, 易于复制, 易于组合和集成等等。许多二元光学元件已在不少领域中得到越来越多的应用^[3~5]。二元光学正以其独有的特色和广阔的应用前景向人们展示了一个诱人的新天地。

二元光学元件制作的工艺流程可分为三步: 一是掩膜板的设计; 二是图形的转移和片基的刻蚀; 三是大量复制。其中第二步是二元光学元件制作质量的关键。由于二元光学技术的核心是通过在任意片基上制作不同位相深度的多台阶的微浮雕结构来提高衍射效率, 位相台阶是将 2π 按 $N = 2, 4, 8 \dots 2^n$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) 等分的方法来划分的, 即各位相所对应的浮雕深度也是二进制量化的, N 越多, 效率越高。为了提高衍射效率就要增大位相台阶数, 但是每次刻蚀只能用一块掩模板控制刻出两种位相台阶, 所以在制作多位相台阶的过程中, 必须使用多个周期按 $1/2^{n-1}$ 递减(空间频率按 2^{n-1} 递增)的掩模板进行套刻, 而每次套刻时, 由于各种原因,

* 江苏省自然科学基金资助。

激光技术编辑部
南京动力高等专科学校访问学者。

必会产生不同的对位误差及刻蚀深度误差等。这些误差对衍射效率的影响究竟怎样？这是人们所关心的。本文采用清晰直观的振幅矢量法对二元光学元件制作的二种主要误差进行了分析，以四位相台阶光栅元件为例推出了衍射效率与二种主要制作误差的解析式。这些分析与探讨对深入认识制作误差与衍射效率之间的关系是很有帮助的。

二、理 论 计 算

以 1:1 空占比的光栅为例，当不考虑制作误差时，它的位相台阶是严格等分的。为使相邻区域的透射光产生 π 的位相差，第一次以周期 T 的光栅模板刻蚀的深度为 $d_1 = \lambda/2(n-1)$ ，

式中， λ 是入射光的波长， n 是玻璃片基的折射率。第二次以周期 $T/2$ 的光栅模板刻蚀的深度为 $d_2 = d_1/2$ ，图 1 画出了位相台阶 $N = 2, N = 4$ 时的结构剖面及相应的 +1 级矢量图示。矢量的大小表示振幅，矢量的方向表示位相。

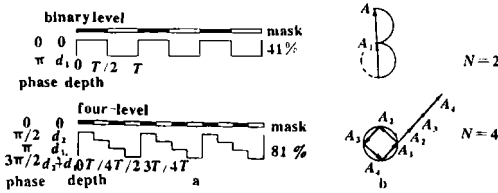


Fig. 1 Structure of binary-level and four-level grating without errors a—surface relief b—+1 order amplitude vector

在实际制作中，误差总是存在的。以四台阶数的二元光栅为例， $N = 2^n = 2^2 = 4$ ，当 N 为总台阶数， n 为套刻的掩模板个数。对第一个掩模而言，它是在基片上刻蚀，当不考虑各种原因造成的条纹宽度的误差时，仅存在刻蚀时的深度误差 Δd_1 ，显然 Δd_1 可正可负 (> 0 表示刻深了， < 0 表示刻浅了)。它对应的位相误差为 $\delta_1 = (\pi/d_1) \Delta d_1$ ；在用第二个掩模套刻时，它既存在刻蚀深度误差还存在着二次片基套不准引起的对位误差。若第二次刻蚀时的深度误差为 Δd_2 ，对应的位相误差为 $\delta_2 = (\pi/d_1) \Delta d_2$ ，同时由于存在第二次片基和第一次的对准偏差，设为 b ，这时原来一个周期单元四个位相区域将变成了六个位相区域，其剖面结构及与之对应的位相 $\varphi(x)$ 如图 2 所示。下面我们

用振幅矢量法分析它的 +1 级衍射效率 η 与对位误差 b 及与深度误差相应的位相误差 δ_1, δ_2 之间的关系。

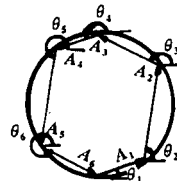
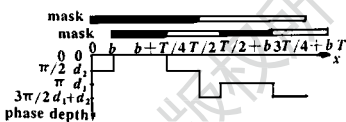


Fig. 2 Structure of surface relief and phase in a period

Fig. 3 +1 order amplitude vector

图是半径为 R 的闭合圆^[6]，现在把一个周期单元根据位相结构分成六区域，如图 3 示，它可等效为与区域对应的六个矢量的叠加，其幅值 A_m 及与 x 轴的夹角 θ_m 可由几何关系得：

| 区 间 | 幅 值 | 位 相 | 刻蚀后(考虑误差)位相 |
|------------------|--------------------------------|------------------------------|---|
| $[0, b]$ | $A_1 = 2R \sin \beta$ | $\varphi_1 = \beta$ | $\theta_1 = \varphi_1 - \pi/2 - \delta_2$ |
| $[b, b + T/4]$ | $A_2 = 2R$ | $\varphi_2 = 2\beta + \pi/4$ | $\theta_2 = \varphi_2 - 2\beta + \pi/4$ |
| $[b + T/4, T/2]$ | $A_3 = 2R \sin(\pi/4 - \beta)$ | $\varphi_3 = \beta + 3\pi/4$ | $\theta_3 = \varphi_3 - \pi/2 - \delta_2$ |

$$\begin{aligned}
 [T/2, b+T/2] & \quad A_4 = 2R \sin\beta & \quad \varphi_4 = \beta + \pi & \quad \theta_4 = \varphi_4 - 3\pi/2 - \delta_1 - \delta_2 \\
 [T/2 + b, b + 3T/4] & \quad A_5 = 2R & \quad \varphi_5 = 2\beta + 5\pi/4 & \quad \theta_5 = \varphi_5 - 2\beta + 5\pi/4 \\
 [b + 3T/4, T] & \quad A_6 = 2R \sin(\pi/4 - \beta) & \quad \varphi_6 = \beta + 7\pi/4 & \quad \theta_6 = \varphi_6 - 3\pi/2 - \delta_1 - \delta_2
 \end{aligned}$$

其中, $\beta = b\pi/T$, 因为刻蚀后只是位相的变化, 各个分矢量的幅值不变, 合振幅矢量为:

$$A = \left(\sum_{m=1}^6 A_m \cos\theta_m \right) i + \left(\sum_{m=1}^6 A_m \sin\theta_m \right) j \quad (1)$$

其振幅平方为:

$$\begin{aligned}
 A^2 &= \left(\sum_{m=1}^6 A_m \cos\theta_m \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^6 A_m \sin\theta_m \right)^2 \\
 &= [A_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_4) + A_2(\cos\theta_2 + \cos\theta_5) + A_3(\cos\theta_3 + \cos\theta_6)]^2 \\
 &\quad + [A_1(\sin\theta_1 + \sin\theta_4) + A_2(\sin\theta_2 + \sin\theta_5) + A_3(\sin\theta_3 + \sin\theta_6)]^2
 \end{aligned}$$

分析可知: $\theta_4 = \theta_1 - \delta_1, \theta_5 = \theta_2 - \delta_1, \theta_6 = \theta_3 - \delta_1$

$$\begin{aligned}
 A^2 &= \{A_1[\cos\theta_1 + \cos(\theta_1 - \delta_1)] + A_2[\cos\theta_2 + \cos(\theta_2 - \delta_1)] + A_3[\cos\theta_3 + \cos(\theta_3 - \delta_1)]\}^2 \\
 &\quad + \{A_1[\sin\theta_1 + \sin(\theta_1 - \delta_1)] + A_2[\sin\theta_2 + \sin(\theta_2 - \delta_1)] + A_3[\sin\theta_3 + \sin(\theta_3 - \delta_1)]\}^2
 \end{aligned}$$

利用三角函数关系, 上式可化简为:

$$A^2 = 16R^2 \cos^2(\delta_1/2) [2 + \sin\delta_2 - 2 \sin(2\beta + \delta_2/2) \sin(\pi/4 + \delta_2/2)] \quad (2)$$

对+1级, 衍射效率与制作误差的关系为:

$$\begin{aligned}
 \eta_{+1} &= A^2 / (2\pi R)^2 \\
 &= (4/\pi^2) \cos^2(\delta_1/2) [2 + \sin\delta_2 - 2 \sin(2\beta + \delta_2/2) \sin(\pi/4 + \delta_2/2)] \quad (3)
 \end{aligned}$$

(3)式即为对位误差及刻蚀深度误差与衍射效率的解析式。

三、讨 论

1. 如果仅考虑对位误差, 即 $\beta \neq 0, \delta_1 = 0, \delta_2 = 0$, 根据(3)式可得衍射效率 η_{+1} 与对位误差的关系为:

$$\eta_{+1} = (8/\pi^2) [1 - \sin(2\beta)] \quad (4)$$

式中, $\beta = (b/T)\pi$, 当对位误差因子 β 从 0 变化到 $\pi/4$

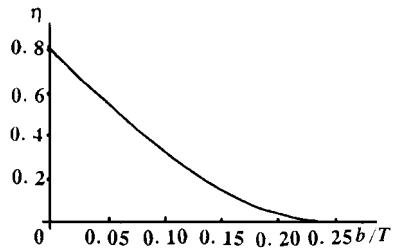


Fig. 4 Relation of diffraction efficiency and aim error

(等效为对位偏离量 b 从 0 变化到 $1/4$ 周期), 对应的衍射效率 η_{+1} 则从 81% 下降至 0。图 4 画出了衍射效率随对位误差增大而下降的关系曲线。

2. 如果仅考虑刻蚀深度误差, 即 $\beta = 0, \delta_1 \neq 0, \delta_2 \neq 0$, 根据(3)式可得衍射效率 η_{+1} 与刻蚀深度误差的关系为:

$$\eta_{+1} = (8/\pi^2) \cos^2(\delta_1/2) \cos^2(\delta_2/2) \quad (5)$$

从式中可以看出此时第一次与第二次刻蚀深度误差的正、负对衍射效率的影响是等价的。并且与刻蚀深度误

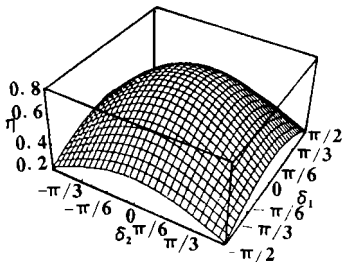


Fig. 5 Relation of diffraction efficiency and depth etching error

差相应的位相误差 δ_1 或 δ_2 对效率降低的影响是对称的(见图 5)。

当误差 δ_1 和 δ_2 很小时有 $\cos(\delta/2) \approx 1 - \delta^2/8$, (5) 式可近似为:

$$\eta_{+1} = (8/\pi^2) \{1 - [(\delta_1/2)^2 + (\delta_2/2)^2]\} \quad (6)$$

可见此时 δ_1 或 δ_2 对衍射效率的影响是相互独立的, η_{+1} 与 δ_1, δ_2 的关系为抛物线函数。

3. 当对位误差和刻蚀深度误差同时存在时, 衍射效率受三个因素($\beta, \delta_1, \delta_2$) 的影响和制约, 其间关系为(3) 式所决定。下面讨论二种情况:

(1) 当 $\beta, \delta_1, \delta_2$ 分别都比较小时, 将(3) 式按泰勒级数展开并取二级近似得:

$$\eta_{+1} = (4/\pi^2) [2 - 4\beta - 2\beta\delta_2 - 1/2(\delta_1^2 + \delta_2^2)] \quad (7)$$

由于 $\beta, \delta_1, \delta_2$ 是小量, 上式中除了 4β 项外, 后几项均为高阶小量, 它表明对位误差因子 β 和深度误差 δ_1, δ_2 相比, 前者是衍射效率下降的主要因素。即若对位误差和深度误差的数值相等, 则对位误差对衍射效率减少的影响要比深度误差的影响大得多。

(2) δ_2 正、负对衍射效率的影响。由(3) 式可知 δ_1 的正、负对衍射效率的影响是等价的而且对称, 而 δ_2 的正、负对衍射效率的影响就不一样了。为便于分析比较, 图 6 绘出了 $\delta_1 = 0$ 或常数时衍射效率 $\eta_{+1} = \eta_{+1}(\beta, \delta_2)$ 的变化趋势。图 7 绘出了 β, δ_1 一定时, η_{+1} 随 δ_2 正、负的变化规律。

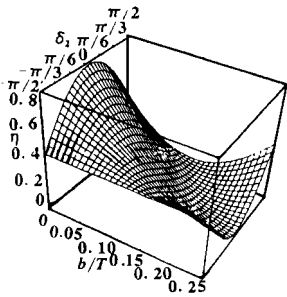


Fig. 6 Relation of diffraction efficiency both aim at error and depth etched error δ_2

分析图 6, 图 7

可知, δ_2 的正、负误差对效率的影响是不同的, 当 δ_2 的数值相同时, 衍射效率 $\eta_{- \delta_2} > \eta_{\delta_2}$; 当存在对位误差时, 适当的 δ_2 的负误差还可以提高衍射效率(与 $\delta_1 = \delta_2 = 0$, 或 $\delta_2 > 0$ 时比较), 这表明可以利用附加刻蚀深度进行效率补偿。

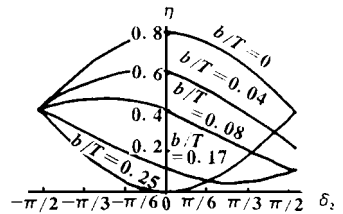


Fig. 7 Relation of diffraction efficiency and depth etched error δ_2

四、结 束 语

本文用振幅矢量法讨论四位相台阶二元光学元件的二种主要制作误差(对位误差及刻蚀深度误差)对衍射效率的影响, 并给出了解析公式。结果表明: 1. 当不考虑刻蚀深度误差时, 衍射效率随对位误差按 $1 - \sin^2\beta$ 关系衰减(其中 $\beta = b\pi/T$, b 对位偏差量, T 周期)。2. 当不考虑对位误差时, 衍射效率随刻蚀深度误差按余弦平方关系衰减。3. 当两种误差都很小时, 各误差对衍射效率的影响基本独立且对位误差是影响衍射效率下降的主要因素; 在对位误差 β 一定的情况下, 适当的刻蚀深度负误差 δ_2 还可进行效率补偿。文中没有涉及二元光学中的另一种误差即条纹横向扩缩误差, 这主要是制版过程、图形转移和刻蚀过程中引起的条纹宽度的变化, 我们准备在另文中详细讨论。

振幅矢量法对四位相台阶二元光学元件的二种主要制作误差的分析清晰、直观、简明, 对 2^n 位相台阶的二元光学元件也可参照此法进行推算讨论。

高功率激光焊接光致等离子体的检测

唐霞辉 朱海红 朱国富 李家容

(华中理工大学激光加工国家工程研究中心, 武汉, 430074)

摘要: 系统地归纳了高功率激光焊接过程中光致等离子体的声、光、电、热等四种特征信号, 综述了国外在等离子体信号检测方面的试验方法及研究进展, 分析了未来的发展趋势。

关键词: 激光焊接 等离子体 信号检测 国外动态

Detection of laser-induced plasma for high-power laser beam welding

Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu, Li Jiarong

(National Engineering Research Center for Laser Processing, HUST)

Abstract: The paper systematically summarizes the four kinds of characteristic signals as acoustics, light, electricity, heat etc., for laser-induced plasma in high-power laser beam welding, also summarizes the overseas experimental methods and research status on detection of plasma signals, at last, analyses the future development in this respect.

Key words: laser welding plasma signal detection overseas status

一、引言

在激光深穿透焊接过程中, 金属材料在高功率密度激光辐照下不仅产生熔化, 而且产生强烈汽化而形成蒸气, 处于激光辐照区内金属蒸气中有一定的起始自由电子, 通过反韧致辐射吸收激光能量而被加速, 直至有足够的能量来碰撞电离材料和周围气体, 电子密度从而雪崩式地增长, 形成等离子体。

参 考 文 献

- 1 Veldkamp W B. Proc SPIE, 1991; 1544: 287~ 299
- 2 Salin A. Optical/ Laser Microlithography ③. SPIE, 1989; 1088: 527
- 3 Swanson G J, Veldkamp W B. Opt Engng, 1989; 28(6): 105
- 4 Leger J R, Mohar M G, Gaybrd T K. Appl Opt, 1995; 34(14): 2399
- 5 周 进, 高文琦, 韩良凯 *et al.* 光学学报, 1995; 15(12): 1726
- 6 Hecht E, Jac A. Optics. London: Addison-Wsley Publishing Company, 1974: 369

* * *
作者简介: 谈苏庆(附照片), 女, 1955年11月出生。讲师。现从事物理教学及科研工作。
周 进, 男, 1959年5月出生。副教授。现从事教学及二元光学方面的研究。
高文琦, 女, 1934年3月出生。教授。现从事教学及计算全息等方面的研究。

收稿日期: 1996-02-12

