

衍射强度均匀分布的二元位相光栅*

聂守平 刘 明 高万荣 赵 琦 陶纯堪

陈伯荣

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

(电子部第十四研究所 南京 210013)

提要 研究了衍射强度均匀分布的二元位相光栅的设计原理,利用微电子工艺加工了 16 个衍射点强度均匀分布的二元位相光栅,并给出了实验结果。

关键词 衍射强度,二元位相光栅,振幅分布

1 引 言

光栅作为一种分光元件,利用其衍射效应可以将一束入射光在输出面上分成一组光点的阵列,衍射强度随着衍射级次的增大而减小。然而在光计算、多路成像及目标识别等系统中,常常要求所产生的光阵列强度均匀分布,即在一定区域内衍射强度不随衍射级次而变化,这就是一种特殊的光栅。为使设计的光栅具有较高的衍射效率且便于加工,本文选用二元位相光栅。

2 基本原理

光栅的结构参数包括振幅分布和位相分布,对于位相光栅其振幅分布为常数,即 $t(x) = 1$, 设其位相分布为 $\theta(x)$, 根据夫琅和费衍射可得光栅的衍射光场分布为^[1]

$$A(n) = \int_0^1 \exp[i\theta(x)] \exp(-i2\pi nx) dx \quad (1)$$

其中 n 为衍射级次。

2.1 对称结构

为了简化光栅的设计,采用对称结构使前后两个半周期位相相差为 ϕ 即

$$\theta(x + 1/2) = \theta(x) + \phi \quad (2)$$

代入(1)式,则

$$A(n) = \int_0^{1/2} \exp[i\theta(x)] \exp(-i2\pi nx) dx + \int_0^{1/2} \exp\{i[\theta(x) + \phi]\} \exp[-i2\pi n(x + 1/2)] dx = \int_0^{1/2} \exp[i\theta(x)] \exp(-i2\pi nx) [1 + (-1)^n \exp(i\phi)] dx \quad (3)$$

当 $\phi = \pi$ 时,则

* 江苏省科委科技发展计划资助项目。

$$A(n) = \int_0^{1/2} \exp[i\theta(x)] \exp(-i2\pi nx) [1 - (-1)^n] dx \quad (4)$$

由(4)式可知,当 n 为偶数时, $A(n) = 0$;当 n 为奇数时,

$$A(n) = 2 \int_0^{1/2} \exp[i\theta(x)] \exp(-i2\pi nx) dx \quad (5)$$

可见采用对称结构,光栅结构参数减少了一半,同时使得衍射级次为偶数时光场分布为零,下面只讨论衍射级次为奇数时的光场分布。

2.2 离散化

在此基础上将光栅表面离散化,可得

$$\begin{aligned} A(n) &= 2 \int_0^{1/2} \exp[i\theta(x)] \exp(-i2\pi nx) dx = \\ &= 2 \int_0^{1/2} \sum_{k=1}^{N/2} \exp[i\theta(x)] \operatorname{rect} \left[\frac{x - \frac{x_{k-1} + x_k}{2}}{x_k - x_{k-1}} \right] \exp(-i2\pi nx) dx = \\ &= \frac{2}{-i2\pi n} \sum_{k=1}^{N/2} \exp(i\theta_k) [\exp(-i2\pi nx_k) - \exp(-i2\pi nx_{k-1})] = \\ &= \frac{1}{i\pi n} \sum_{k=1}^{N/2} \exp(-i2\pi nx_k) [\exp(i\theta_{k+1}) - \exp(i\theta_k)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\operatorname{rect}(x)$ 为矩形函数。

2.3 二元位相光栅

由于多级位相光栅^[2]加工比较复杂,这里采用二元位相光栅,设其位相差为 $\Delta\theta$,即

$$\theta_k = \theta_0 + (-1)^k \Delta\theta/2 \quad (7)$$

代入(6)式,可得

$$A(n) = \frac{-2}{\pi n} \exp(i\theta_0) \sin \left[\frac{\Delta\theta}{2} \right] \sum_{k=1}^{N/2} (-1)^k \exp(-i2\pi nx_k) \quad (8)$$

当 $\Delta\theta = \pi$ 时,

$$A(n) = \frac{-2 \exp(i\theta_0)}{\pi n} \sum_{k=1}^{N/2} (-1)^k \exp(-i2\pi nx_k) \quad (9)$$

对于强度 $I(n) = A(n) \cdot A(n)^*$,位相因子不起作用,因此上式可以简写成

$$A(n) = \frac{2}{\pi n} \sum_{k=1}^{N/2} (-1)^k \exp(-i2\pi nx_k) \quad (10)$$

采用最小二乘法^[3]求解(10)式,得出光栅结构参数 x_k ,使其满足 $I(n) = \text{常数}$ 。

3 微电子加工工艺

1) 首先用图形发生器(PG3600F型)按照设计参数制作光栅的掩模版,光栅一个周期为 $102.6 \mu\text{m}$,其中最小线宽为 $2 \mu\text{m}$,将其复制成 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的掩模版。图1所示为产生16个衍射点均匀分布的二元位相光栅掩模版的显微照片。

2) 在经过严格清洗的光学玻璃基片上,真空蒸发铝膜,铝膜的厚度以能抗得住离子束刻蚀为标准,实验表明应在 $0.7 \mu\text{m}$ 左右,如图2(a)所示。

3) 在蒸发铝膜的光学玻璃基片上,均匀涂上光刻胶,经前烘(80°C , 0.5 h)后,进行光刻,

如图 2 (b) 所示。

4) 将光刻好的基片经坚膜(160°C, 0.5 h)后, 用碱性氰化钾溶液腐蚀未被光刻胶遮盖部分的铝膜(此时暴露出来的是所需要的光栅图形的光学玻璃), 并清洗光刻胶, 如图 2 (c) 所示。

5) 将已经复制好图形的光学玻璃基片置于 LKJ-3A 型离子束刻蚀机中进行离子束刻蚀, 如图 2 (d) 所示。刻蚀深度 d 所产生的位相应为 π , 即

$$k(n - 1)d = \pi$$

其中 k 为波数, n 为基片的折射率(这里选择 n 为 1.5 的光学玻璃), 则 $d = \lambda$ 。由于选用 He-Ne 激光, 因此刻蚀深度为 $0.6328 \mu\text{m}$ 。

6) 将基片上剩余的铝腐蚀掉, 即获得所需要的光栅, 如图 2 (e) 所示。

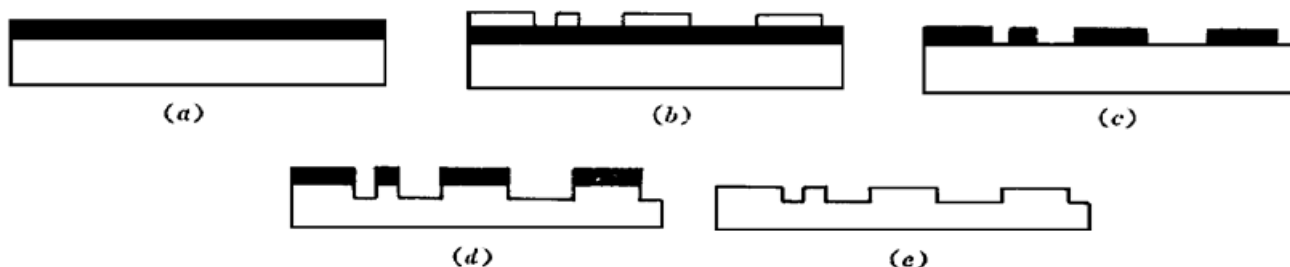


图 2 二元位相光栅加工工艺

Fig. 2 Fabrication steps for binary phase gratings

4 实验结果

图 3 所示为光栅的衍射图案, 图 4 所示为用 $x-y$ 扫描仪记录的光栅衍射强度曲线, 从图中可以看出其偶数级衍射强度皆为零, 奇数级衍射光强基本相等, 其标准偏差 σ 为 0.081。分析误差主要来源有: (1) 由于光栅线条很细($2 \mu\text{m}$), 尺寸很大($30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$) 造成的模版加工误差; (2) 光栅刻蚀误差; (3) 扫描记录仪误差。为了进一步验证光栅的性能, 如图 5 所示为用光栅构成的多路成像系统, 其中 He-Ne 激光器功率为 3 mW, 经过扩束准直的平面光波垂直照明 p_1 面上的透明片“T”, 衍射光栅紧贴在焦距为 100 mm 的成像透镜后面, 则在像面 p_2 上得到“T”的阵列, 如图 6 所示, 这一结果从实验的角度验证了光栅的设计和加工是合理和有效的。

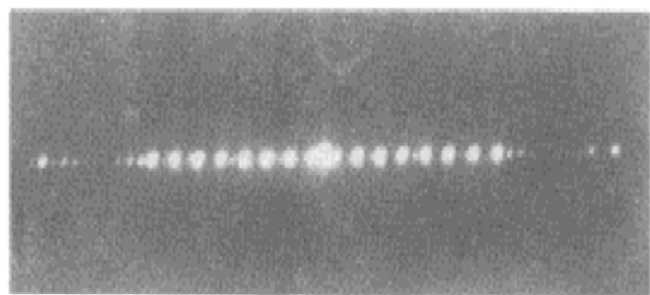


图 3 光栅的衍射图案

Fig. 3 Diffraction patterns of gratings

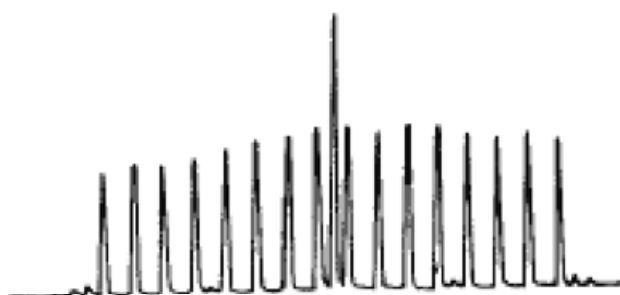


图 4 光栅的衍射强度曲线

Fig. 4 Diffraction intensities of a grating

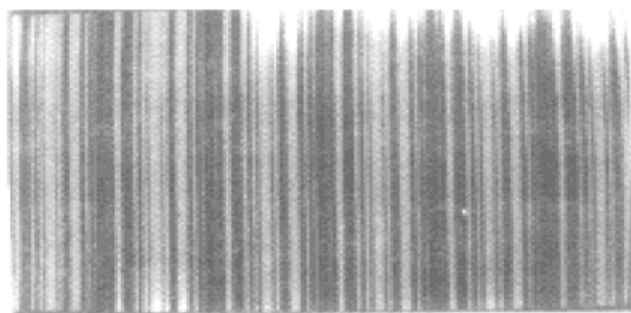


图 1 光栅掩模版

Fig. 1 Mask patterns of gratings

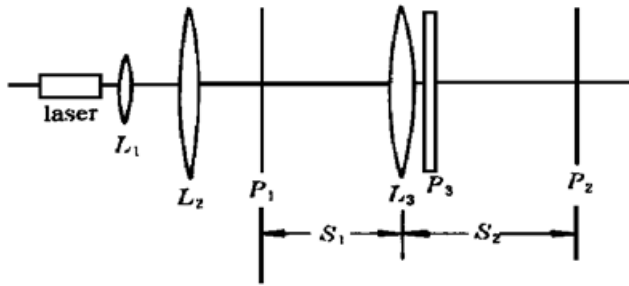


图 5 多路成像系统

Fig. 5 Multi-channel imaging system

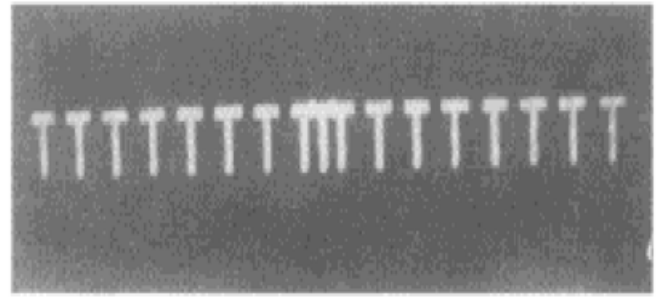


图 6 多路成像结果

Fig. 6 Multi-channel imaging

参 考 文 献

- 1 R. L. Morrison. Symmetries that simplify the design of spot array phase gratings. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1992, **9**(3): 464~ 471
- 2 S. J. Walker, J. Jahns. Array generation with multilevel phase gratings. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1990, **7**(8): 1509~ 1513
- 3 Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. An Introduction to Numerical Analysis. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1988. 101~ 110

Binary Phase Gratings with Well-distributed Diffraction Intensities

Nie Shouping Liu Ming Gao Wanrong Zhao Qi Tao Chunkan

(Department of Electronic Engineering and Optical-electronic Technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

Chen Borong

(The 14th Institute, Ministry of Electronics Industry, Nanjing 210013)

Abstract In this paper, the design principle of binary phase gratings with well-distributed diffraction intensities is discussed. Binary phase gratings with 16 orders well-distributed diffraction intensities are fabricated by using micro-electro technology and experimental results are given.

Key words diffraction intensities, binary phase gratings