

二值位相光栅的设计与制作

卢振武 钱龙生 廖江红 郑宣明 赵晶丽

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 我们采用了新的算法对二值位相光栅进行了设计, 并对制作时可能产生的误差及它们对位相光栅的衍射效率和光强均匀性的影响进行了讨论。我们用薄膜沉积的方法进行了位相光栅的制作, 对光栅进行了实际测量, 把测量结果与理论值进行了比较, 结论与我们的理论分析相符。

1 引言

利用位相光栅, 可以把一束光等光强地分成多束, 形成光束阵列。作为照明系统, 它可作为二维光学逻辑阵列的照明光源^[1], 也可以作为表面发射激光二极管阵列的泵浦光源^[2]。作为一物成多像系统, 它可广泛应用于并行光学信息处理系统中。产生光束阵列的方法有多种, 例如用针孔阵列^[3]、透镜阵列、泰堡效应^[4]和全息方法^[5]等, 但它们都存在着一定的缺点。针孔阵列的光能量利用率太低; 透镜阵列和泰堡效应虽然在理论上光能量利用率可以达到 100%, 但它们需要把激光器输出的光束的高斯波面转换成平面波, 使该系统至少需要两个以上的光学元件, 使系统复杂和最终降低光能量利用率; 全息方法一般来说衍射效率较低, 况且乳胶的散射会产生附加噪声, 乳胶的非线性也会引起一定的像差, 尤其是用于成像系统时, 由于全息图一般都是离轴的, 会产生较大的像差。为了克服上述问题, Dammann^[6]首先提出了用位相光栅来产生光束阵列的方法, 这一方案在八十年代, 特别是八十年代后期, 引起了人们的广泛的注意, 并得到了迅速地发展。基于标量衍射理论人们先后提出了各种不同的设计方法, 如傅里叶迭代法^[7], 解非线性方程组的牛顿法^[8]和模拟退火的优化方法^[9], 使其设计理论日臻成熟、完善。加工方面主要采取反应离子束刻蚀和薄膜沉积的方法。在这篇文章里, 我们基于神经网络^[10]的概念, 提出了一种新的算法, 使其设计时间大大地缩短。然后对制作过程中可能产生的误差进行了分析, 并以此为依据, 设计出了易于制作的位相光栅。用薄膜沉积的方法进行制作, 对其衍射效率, 均匀性等进行了测量, 给出了实验结果。

2 理论分析与设计

按照 Dammann 所提出的方案, 一个周期性位相光栅 $G(x)$ 可以表示为

$$G(x) = P(x) * \text{comb}(x) \quad (1)$$

这里 $P(x)$ 是位相光栅的一个周期, * 表示卷积。一般应用位相光栅作为多重像系统的分束元件,都把位相光栅置于会聚透镜之前,而在其后焦面上获得输出,因此,它的振幅衍射图案在数学上可由傅里叶变换来描述,即

$$P(n) = \int_0^1 P(x) \exp(-2\pi i n x) dx \quad (2)$$

上式中假定了光栅的周期为单位一。对二值化的位相光栅,它的位相只能取两个值,其位相突变点称为转折点,该点坐标可表示为 $x_k, k=1, 2, \dots, N$, 如图 1 所示,由于位相光栅的振幅透射率为 1, 所以方程(2)可改写成^[10]

$$P(n) = \int_0^1 \exp(i\theta_k) \exp(-2\pi i n x_k) dx_k \quad (3)$$

在 n 不为零时,其振幅表达式的方程为

$$P(n) = \frac{-1}{2\pi i n} \sum_{k=1}^N \exp(i\theta_k) [\exp(-2\pi i n x_k) - \exp(-2\pi i n x_{k-1})] \quad (4)$$

由光栅的周期性可知 $\exp(-2\pi i n x_0) = \exp(-2\pi i n x_N)$, (4)式也可以表示为

$$P(n) = \frac{-1}{2\pi i n} \sum_{k=1}^N \exp(-2\pi i n x_k) [\exp(i\theta_{k+1}) - \exp(i\theta_k)] \quad (5)$$

同样, $n=0$ 时,其振幅可表示为

$$P(0) = \sum_{k=1}^N (x_k - x_{k-1}) \exp(i\theta_k) \quad (6)$$

对如图 1 所示的二值化位相光栅,若令 θ_0 表示

其两位相值的中间值, θ 表示两位相之间的差值,那么

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

因为 θ_0 是一个任意常数,在以后的分析中,为了简便我们可令其为 0,把(7)代入(5)式,我们有

$$\begin{aligned} P(n) &= \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\pi n} \sum_{k=1}^N (-1)^k \exp(-2\pi i n x_k) \\ &= \sin \frac{\theta}{2} \sum_{k=1}^N (-1)^k A(n) \exp(-2\pi i n x_k) \end{aligned} \quad (8)$$

相应的零级振幅为

$$P(0) = \exp(i\theta_1) - 2 \sin \frac{\theta}{2} \sum_{k=1}^N (-1)^k x_k \quad (9)$$

由方程(1)我们可以看出, $P(n) = -P^*(-n)$, 因此在设计时我们不用再去考虑正级次与负级次的匹配问题,因为它们的强度总是相等的。

我们采用了神经网络后向传播^[11]和模拟退火相结合的一种新的算法,对位相光栅进行了设计。与其它算法相比较,这种算法有较快的收敛速度,能迅速跳出次极小值。其训练神经元为 Supervised 型。例如,欲设计一个输出为 $(2N+1)$ 点阵的二值位相光栅,输入神经元为 N 个,其值均为 1(平面波照明)。第一层神经元权重为

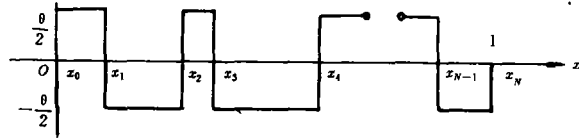


图 1 位相光栅的一个周期

$$W_{kj}^{(1)} = \begin{cases} 0 & k \neq j \\ x_k & k = j \end{cases} \quad (10)$$

其中 x_k 为位相光栅坐标值。第二层网络的权重由方程(8)、(9)决定,是和坐标 x_k 有关的指数项。

在输出神经元为 $(2N+1)$ 时,其输出假定为位相光栅衍射效率为 1 时的等光强值,即每一点输出均为 $1/(2N+1)$,训练第 m 次时,第一层的权重为第 m 次时输出误差经后向传播返回到第一层的增量与原权重之和,即

$$W_{kj}^{(1)}(m+1) = W_{kj}^{(1)}(m) + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_k} |W_{kj}^{(2)}|^2 \delta_j \quad (11)$$

模拟退火的消费函数(Cost function)是选用神经元输出的平均均方根误差和输出偏离理想值时的均方根误差之线性之和来表征的。

利用上述模型,我们用 C 语言编写了一个计算位相光栅的程序,计算了多种光栅。例如对一个 1×5 的位相光栅,在 IBM386 兼容机上运行不到一个小时,就可获得很理想的结果,其衍射效率可达 77.1%,均方根误差 $\sigma=0.15\%$,与用其它算法得到的结果相符^[12]。

3 位相光栅的制作与误差分析

在光栅制作上,我们采取了薄膜沉积的方法,其工艺过程大致如图 2 所示。首先把按设计要求制作好的掩模板的图形转移到涂有光刻胶的片基上,然后通过薄膜沉积的方法,按照理论计算所需的厚度,把薄膜均匀地沉积到带有图案的片基上,最后清除光刻胶,即得到了我们所需要的位相光栅。位相光栅的质量,主要由掩模板制作过程和图形转移过程中各位相转折点的 x_k 的准确与

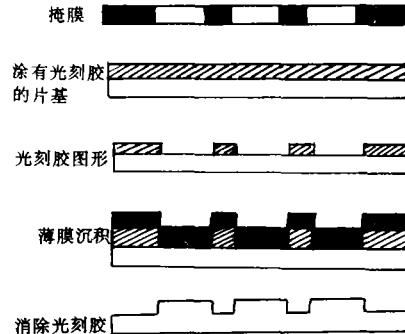


图 2 位相光栅制作过程

表 1 位相光栅各级次实测值与理论值

衍射级次	-7	-5	-3	-1	1	3	5	7
理论值	0.0947	0.0947	0.0952	0.0949	0.0949	0.0952	0.0947	0.947
实测值	0.0700	0.0792	0.0872	0.0898	0.0872	0.0846	0.0766	0.0661

否和在薄膜沉积过程中光学厚度是否精确来决定。我们将分别对它们对光栅的衍射效率和均匀性等影响进行讨论。

3.1 转折点 x_k 不准确引起的误差

设一位相光栅的准确的转折点为 $(x_1 \cdots x_k \cdots x_N)$ 由于制作精度而引起一定的误差,有误差后各转折点为 $(x_1 + d_{x_1} \cdots x_k + d_{x_k} \cdots x_N + d_{x_N})$,则由位置误差所引起的强度化可以表示为:

$$dI_N = d(P(n)P^*(n)) = P(n)dP^*(n) + P^*(n)dP(n) \quad (12)$$

而

$$dP(n) = (-2\pi in) \sin \frac{\theta}{2} \sum_{k=1}^N (-1)^k A(n) \exp(-2\pi i n x_k) dx_k \quad (13)$$

由(13)式可以看出, $dP(n)$ 与 n 有关, 即由位置误差而引起的强度误差随 n 变化而不同, 而不是与 n 无关⁽⁸⁾。

3.2 位相不准确引起的误差

在我们的实验中, 位相误差主要是由于在制作过程中薄膜沉积的厚度不准确而引起的, 它对各衍射级次的强度的影响可由各级次强度对 θ 的微分求得

$$dI_n = \frac{\frac{1}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} d\theta}{(2\pi n)^2} \left| \sum_{k=1}^N (-1)^k \exp(-2\pi i n x_k) \right|^2 \quad (14)$$

上式可简化为

$$dI_n = I_n \cdot \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \cdot d\theta \quad (15)$$

由(15)式可知, 当 $\theta = \pi$ 时, $\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = 0$, 这时位相光栅对位相变化最不敏感, 因此, 在设计二值位相光栅时, 使其位相差为 π , 可以降低位相光栅对制作时对位相控制精度的要求, 容易制作出高质量的位相光栅。

4 实验结果及讨论

在光栅设计时, 考虑到它的制作难度, 为降低其对位相控制精度的要求, 我们采用了 $(0, \pi)$ 的位相台阶。并用薄膜沉积的方法, 制作了数种位相光栅, 并对 1×8 的位相光栅的均匀性和衍射效率进行以测量, 其结果由表 1 给出。通过与理论值对比, 我们可以看出, 随着衍射级次的增加, 光栅的衍射效率下降, 与我们分析结果相符。

本文提出了一种新的二值位相光栅的设计方法, 编写了通用设计程序, 实际设计了几种位相光栅, 并对制作过程中可能产生的误差进行了分析。采取了薄膜沉积的方法进行制作, 这种方法与反应离子束刻蚀相比, 有着许多明显的优点。首先它对片基无特殊要求, 一般光学玻璃即可; 其次它可以大面积均匀沉积, 易制作出大口径光学元件; 最后薄膜沉积的厚度可以精确控制。我们对位相光栅进行了实际测量, 其结果证明了我们设计与理论分析的正确性。

参 考 文 献

- [1] P. A. B. Miller et al., Appl. Opt., 49(1986), 821
- [2] J. L. Jewell et al., Appl. Phys. Lett., 54, (1989), 1400
- [3] P. A. Newman et al., Appl. Opt., 5, (1966), 1225
- [4] J. T. Winthrop et al., J. Opt. Soc. Am., 55, (1965), 373
- [5] G. Groh, Appl. Opt., 8, (1969), 967
- [6] H. Dammann et al., Opt. Commun., 3, (1971), 312
- [7] N. C. Gallagher et al., Appl. Opt., 12, (1973), 2328
- [8] J. Jahns et al., Opt. Eng., 28, (1989), 1267
- [9] M. R. Feldman et al., Opt. Lett., 14, (1989), 479
- [10] R. L. Morrison, J. Opt. Soc. Am., 9, (1992), 464

[1]P. D. Wasserman, "Neural Computing: Theory and Practice", VNR Press, 1989

[2]H. Dammann et al. , Opt. Acta, 24, (1977), 505

Design and Fabrication of Binary Phase Grating

Lu Zhenwu, Qiang Longsheng, Liao Jianghong,

Zheng Xunming and Zhao Jingli

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

A new design method for binary phase grating used as array generator is presented and the effects of fabrication errors on the efficiency of the grating are investigated. As a example, a phase grating made by using film deposition was tested and the results agree with the theoretical analysis.