

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0495-04

# 用光谱法测试相位光栅层的厚度

曹向群, 连华, 李何立

(浙江大学国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

**摘要** 按傅里叶光学,当平面波通过光栅时,不同级次的衍射角和强度由光栅而定,根据光栅的衍射频谱可以反推出光栅本身的多种信息。一个新的方法就是选用不同级次的功率谱来测量相位光栅的深度。对 3 块光栅进行了测试,并给出计算的光栅深度。同时给出 6 块光栅的测试结果——多级衍射强度,结果表明误差值不大于 5%。

**关键词** 相位光栅; 测试; 衍射谱

中图分类号 O438.2

文献标识码 A

## Testing the Depth of Phase Grating by Optical Power Spectrum

Cao Xiang-qun, Lian Hua, LI He-li

(CNERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** According to Fourier optics, when a plane wave through a grating, the angle of different order and relative intensity are decided by the grating, many information of gratings can be deduced from its diffraction power spectrum. A new method using power spectrum of different orders to measure depth of phase gratings. three gratings were tested in this paper and the calculated depth was given. The testing results of diffractive order of 6 gratings——about many orders intensity——were listed in table, The error of results is under 5%.

**Key words** phase grating; testing; diffractive spectrum

### 1 引言

目前计量光栅的使用范围很广,对 Ronch 光栅而言,主要用于位置控制、长度计量、角度测试、运动控制等等,该类光栅主要特性是栅线部分不透光,用计算机语言,则其特性为 0,1(即不透光部分为 0,透光部分为 1)。而目前,相位光栅的应用与日俱增,除其可用于计量领域之外,还可用于分光的场合,相位光栅的特性是栅线与栅缝皆能透光,两部分的光束形成干涉光束,形成用户所需的光束特性,由于相位光栅是相干光的结果,其制造工艺要求较高。目前,由于光刻、镀膜、离子蚀刻等工艺水平的提高,因此

通过努力,即能制造出相应要求的相位光栅。本文介绍相位光栅的制造、测试及其性能,特别详细阐述测试方法及其测试结果。

### 2 相位光栅性能

根据信息光学原理,矩形光栅对于平行入射光振幅的调制作用,与一系列包含基频和各次谐频的余弦光栅基元的联合调制作用等效。激光通过矩形相位光栅后发生衍射,夫朗和弗衍射图样的复振幅分布如(1)式所示。

$$U(x,y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)\right] \times \left[ [\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)] \frac{a}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \delta\left(\frac{x}{\lambda z} - \frac{n}{d}, \frac{y}{\lambda z}\right) + \exp(j\phi_1) \delta\left(\frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z}\right) \right] \quad (1)$$

衍射屏上的复振幅分布实质上是 sinc 函数,图 1 表现复振幅分布的图像。

将该公式中各个级次的复振幅相分离,可以得到零级的复振幅为

$$U(x,y)_0 = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)\right] \left[ [\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)] \frac{a}{d} \delta\left(\frac{x}{\lambda z} - \frac{n}{d}, \frac{y}{\lambda z}\right) + \exp(j\phi_1) \delta\left(\frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z}\right) \right] \quad (2)$$

一级的复振幅为:

$$U(x,y)_1 = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)\right] \left\{ [\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)] \operatorname{sinc}\left(\frac{a}{d}\right) \delta\left(\frac{x}{\lambda z} - \frac{n}{d}, \frac{y}{\lambda z}\right) \right\} \quad (3)$$

由此可知,一级和零级的复振幅的比值为

$$\frac{U(x,y)_1}{U(x,y)_0} = \frac{[\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)](a/d) \operatorname{sinc}(a/d) \delta(x/\lambda z - n/d, y/\lambda z)}{[\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)](a/d) \delta(x/\lambda z - n/d, y/\lambda z) + \exp(j\phi_1)(x/\lambda z, y/\lambda z)} \quad (4)$$

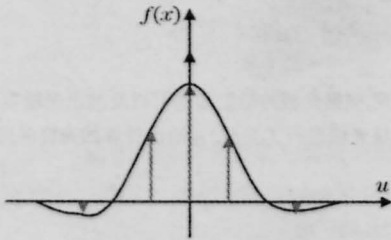


图1 复振幅分布示意图

Fig.1 Diffraction pattern of rectangular stripe

为了让讨论简化,特别是测试的对象,只考虑一维的情况,此时(4)式又可简化为

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{[\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)](a/d) \operatorname{sinc}(a/d)}{[\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)](a/d) + \exp(j\phi_1)} \quad (5)$$

一级和零级的强度比为复振幅模的平方之比,即

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{|[\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)](a/d) \operatorname{sinc}(a/d)|^2}{|[\exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1)](a/d) + \exp(j\phi_1)|^2} \quad (6)$$

$\phi_1, \phi_2$  分别为光线射过基体和光栅深度的衍射面上的相位差。光栅深度为  $h$ , 基体厚度为  $d$ , 光栅材料的折射率为  $n$ , 由图 2 所示。

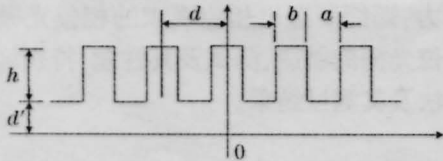


图2 相位光栅的相位差

Fig.2 Phase contrast of phase gratings

则  $\phi_1, \phi_2$  分别满足

$$\phi_1 = 2\pi \frac{h+nd}{\lambda}$$

$$\phi_2 = 2\pi \frac{n(h+d)}{\lambda}$$

在  $\phi_1, \phi_2$  中含有  $h$  的信息, 将  $\phi_1$  与  $\phi_2$  相减后, 有:

$$\phi_2 - \phi_1 = 2\pi \frac{(n-1)h}{\lambda} \quad (7)$$

也就是说, 只含有  $h$  的信息。因此, 在得知零级和一级之间的功率后, 进行换算, 可以得到光栅的深度  $h$ 。

例如: 当占空比为 1:2 时,

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{[1 - \cos(\phi_2 - \phi_1)] \operatorname{sinc}^2(1/2)}{1 - \cos(\phi_2 - \phi_1)} \quad (8)$$

只要用功率计测出一级和零级之间的光强, 利用其比值就可得出光栅的深度。事实上, 从原理上讲, 利用其他级次的衍射光强和零级光强相比较, 也

可以求得光栅的深度。但是, 由于高级次的强度一般比较小, 受外界环境影响显著, 例如背景光, 有可能背景光的强度与高级次的衍射强度相当, 此时, 用高级次的衍射强度代入计算就会产生较大的误差。因此, 建议用一级和零级的比值进行计算光栅深度。

由于  $\phi_2 - \phi_1$  是由  $\cos(\phi_2 - \phi_1)$  求反函数得到的, 而  $\cos(\phi_2 - \phi_1)$  在  $[0, \pi]$  中是单调递减的。因此, 为了使  $\cos(\phi_2 - \phi_1)$  只对应单一的相位差, 要求用这种方法测量光栅厚度时, 满足

$$\phi_2 - \phi_1 = 2\pi \frac{(n-1)h}{\lambda} \leq \pi$$

因此有

$$h \leq \frac{\lambda}{2(n-1)} \quad (9)$$

所以, 用频谱法测量时, 有一定的高度范围, 大于一定高度, 将不能用直接换算的方法得到光栅厚度, 要进行进一步的换算才可以。

### 3 测试装置

测试时采用氦氖激光作光源, 用功率计作读数, 其系统示意图如图 3 所示。为测试时调整上的方便, 激光器有可调水平的螺丝, 光栅亦可以调整, 以便使谱点处于一水平线上, 使微功率计探头在水平方向移动时, 使各级谱在读数时皆处于探头的中心, 从而一一读出数据。

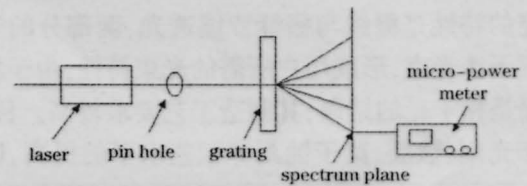


图3 测试原理图

Fig.3 Principle of testing

### 4 测试数据

#### 4.1 测试分光

测试光栅的要求如下: 光栅应用时光路示意图如图 4 所示, 其技术要求为: 光源波长  $650 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ , 光栅节距  $p$  为  $42 \mu\text{m}$ , 占空比为 1/2,  $\tau = 21 \mu\text{m}$ , 透过率  $(i_{+1} + i_{-1} + i_0)/i \geq 85\%$ ,  $i_{\pm 2}/i_0 = 0.25 \pm 0.03$ ,  $i_{\pm 1}/i_0 = 1 \pm 0.02$ 。

光栅采用光刻及氢氟酸腐蚀工艺进行复制,然后把大块光栅按尺寸划成一块块光栅,选择6只试件进行测试,结果如表1所示。

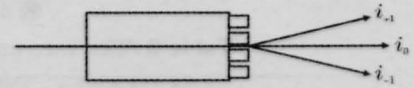


图4 光栅光路示意图

Fig.4 Optic path sketch of the grating

表1 6块光栅测试结果

Table 1 The data for six samples

Order of the grating	1	2	3	4	5	6
$i_{-4}$	2.8	3.4	4.5	4.3	3.4	2.0
$i_{-3}$	8.3	8.2	6.4	2.8	11.6	8.0
$i_{-2}$	2.8	3.3	5.8	8.4	2.0	3.0
$i_{-1}$	9.2	93.2	83.0	59.8	105.0	79.0
$i_0$	382.5	358.7	356.1	402.9	311.6	351.7
$i_{+1}$	90.6	93.2	81.8	58.1	97.0	78.0
$i_{+2}$	3.4	4.2	5.5	8.3	1.7	3.2
$i_{+3}$	8.2	8.2	6.2	2.6	8.2	9.2
$i_{+4}$	2.8	3.4	4.0	4.5	1.3	2.3
$(i_n+i_0)/i$	87%	88%	85%	86%	87%	85%
$i_{-1}/i_{+1}$	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01
$i_{\pm 1}/i_0$	0.23	0.23	0.23	0.15	0.31	0.22
$>\sum i_{\pm 5}$	52	61	61	47	35	52
pass	✓	✓	✓			✓

#### 4.1.1 测试数据分析

腐蚀工艺制造的光栅,其一致性比较差,抽测的6只试件,有4件合格,其余或是正负一级能量之比例不符或是一级光与零级光不符而不合格。这是腐蚀光栅的不均匀性所导致的。

#### 4.1.2 测试注意

使用该系统测试时,有几个问题需注意,以提高测试数据的稳定性。

1) 探头测试各级光谱时,需移动探头,此时,各光谱点皆应位于一水平线上,以便从负极次到正极次移动时,谱点始终处于探头的中心,不然会导致正负级次的数据相差甚远(因功率计探头的中心与周围灵敏度有差别)。

2) 当周围有辐射能量变化时,微功率计读数会

出现跳动,为此需保持周围环境的稳定性。

3) 在微功率计探头移动而读取某谱点能量时,应读取最大值。

4) 可读取2~3次作平均值,使读取数值较准确。

#### 4.2 测试光栅层深度

根据对相位光栅性能的分析,测试光栅层深度可以通过测试零级光及1级光的光强来进行,表2是其测试结果,这些光栅是通过光刻,离子蚀刻而成,抽三块光栅测试其性能,并计算其厚度。

该批光栅的名义深度为307.7nm,对每一光栅测试,每个点测量两次,然后取平均值并代入,上面叙述的式中计算结果为300nm,325nm,318nm。最大误差约为5%。



表 2 光栅零级和一级数据及深度

Table 2 The zero and first order data and depth of the grating

Order	Negative first order	Zero order	First order	Zero/first order	Average value	Depth of the grating
1	101.0	397.0	101.0	0.2556	0.2553	300
	101.0	396.0	101.0	0.2550		
2	114.0	357.2	116.0	0.3219	0.3119	325
	114.1	361.6	114.9	0.3166		
3	115.8	390.2	115.8	0.2967	0.2988	318
	115.5	387.6	117.8	0.3301		

## 参 考 文 献

- 1 Cao Xiangqun, Huang Weisi, Jin Tong. The Technology of the Metrologic Gratings[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992. 39-61  
曹向群, 黄维实, 金彤. 光栅测量技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 39-61

- 2 J. D. Gaskill. Linear System, Fourier Transforms and Optics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978. 99-134  
3 Zhu Shao *et al.* Diffract Gratings [M]. Beijing: China Machine Press, 1986. 5-25  
祝绍等编著. 衍射光栅[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.5-25