

文章编号: 1000-5013(2012)03-0251-04

用衍射效率比测浮雕矩形光栅参量

陈唐荣, 赵良春, 戴文海, 庄其仁

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于矩形光栅的标量衍射效率公式, 提出一种根据 0 级和 1 级衍射效率比来测量浮雕矩形光栅的刻槽深度和折射率的方法, 并对衍射效率与刻槽深度和入射角的关系进行分析. 对刻槽深度分别为 2.90, 1.01 μm 的熔石英离子刻蚀矩形光栅进行测量, 从实验上验证测量方法的正确性. 研究表明: 通过测量透过光栅的 0 级和 1 级衍射光强比, 可反演出矩形光栅刻槽深度和塑料光栅材料的折射率, 所测量光栅刻槽深度和折射率的误差均小于 1%.

关键词: 矩形光栅; 衍射效率比; 激光衍射; 光栅参数; 衍射光强比

中图分类号: O 436.1 **文献标志码:** A

光栅衍射器件因结构简单、体积小等优点在光纤通信和光纤传感技术领域得到广泛应用. 随着光栅种类的不断增加, 各种光栅参数的测定显得尤为必要. 目前, 光栅参数的测量方法可分为两大类: 直接测量法与间接测量法. 前者常利用有关仪器, 如分光计^[1]、原子力显微镜^[2]、衍射光栅结合 CCD^[3] 等来测量光栅的相关参数. 但这些仪器结构复杂、操作技术要求高, 导致测量成本增大而不易被推广. 近年来, 随着优化算法的日益完善, 具有无损伤优点的间接测量光学参数方法^[4-7] 引起人们的注意. 测量衍射光栅的光学参量有椭圆法^[6-7] 等. 如文献[8]提出一种利用透射光谱结合优化算法来反演衍射光栅参量的方法, 通过衍射光栅两个对称级次($m = \pm 1$) 的能量比来处理光栅表面粗糙度的影响, 实现了光栅参量的成功反演. 众所周知, 光栅各衍射级次透射率是光栅参数的函数, 但它们之间不是线性的表达式. 由于衍射光栅每一衍射级次的能量测量简便, 实验数据稳定且精确, 因而采用单波长激光束透过光栅的衍射光斑图样可反映光栅的表面信息. 本文提出一种简便的测量光栅刻槽深度和光栅材料折射率的方法.

1 测量原理

图 1 为矩形光栅截面图. 图 1 中: d 为周期; τ 为脊宽; h 为刻槽深度; n 为折射率. 当入射光以 θ 角入射到光栅表面时, 在标量衍射理论基础上采用透过率函数的傅里叶级数展开和复振幅的傅里叶变换方法来计算矩形光栅各衍射级次的衍射效率. 其一般表达式^[9] 为

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= 1 - 2\rho(1 - \rho)(1 - \cos \Delta\phi), \\ \eta_{m>0} &= \frac{1}{m^2 \pi^2} (1 - \cos 2m\pi\rho)(1 - \cos \Delta\phi). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为占空比, $\rho = \tau/d$; m 为衍射级次; $\Delta\phi$ 为 θ 角入射的光线经过光栅衍射后光波的相位差. 当 $\rho = 1/2$ 时, 偶数级次($\pm 2, \pm 4, \dots$) 的衍射效率为零, 即矩形光栅衍射的缺偶级现象. 根据式(1)可得

$$\eta_0 = \frac{1}{2}(1 + \cos \Delta\phi), \quad \eta_{m>0} = \frac{2}{m^2 \pi^2}(1 - \cos \Delta\phi). \quad (2)$$

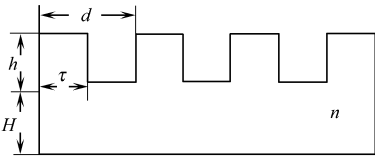


图 1 矩形光栅结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a rectangular grating

由式(2)可知,当 m 为奇数($m=1,3,5,\cdots$)时,1 级衍射效率与更高级次衍射效率的比值 $\eta_1/\eta_m=m^2$ 是一个只与 m 有关的常数,而 1 级衍射效率与 0 级衍射效率的比值为

$$\frac{\eta_1}{\eta_0} = \frac{4(1 - \cos \Delta\phi)}{\pi^2(1 + \cos \Delta\phi)}.$$

(3)

令 $\eta_1/\eta_0=R(h,\theta)$,则由式(3)可得

$$R(h,\theta) = \frac{4(1 - \cos \Delta\phi)}{\pi^2(1 + \cos \Delta\phi)} = \frac{4[1 - \cos[\frac{2\pi h}{\lambda}(\frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} - \frac{1}{\cos \theta})]]}{\pi^2[1 + \cos[\frac{2\pi h}{\lambda}(\frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} - \frac{1}{\cos \theta})]]}.$$

(4)

根据式(4)可知,当入射光垂直入射到光栅表面(即 $\theta=0$)时,可得

$$h = \frac{\lambda}{2\pi}(1 + \arccos(\frac{4 - R\pi^2}{4 + R\pi^2})).$$

(5)

式(5)中的 $R=R(h,\theta)$,可由实验测量 0 级衍射和 1 级衍射的衍射光强比而得到. 因此,由式(5)可简便地算出光栅刻槽深度 h .

图 2 为实验装置. 图 2 中:光源部分由激光源、激光准直光学组件(透镜和光阑)组成;激光光束经衍射光栅衍射,用光功率计测量 0 级和 1 级的光强度,得到衍射效率比 R .

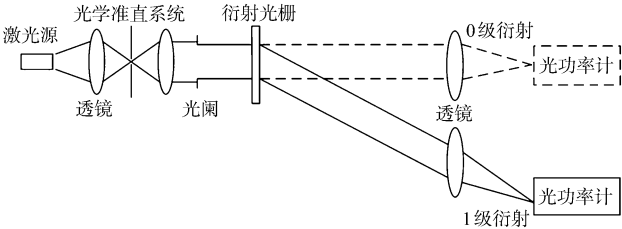


图 2 实验装置示意图
Fig.2 Experimental setup

2 实验结果

2.1 入射角的选择

根据式(4)模拟计算在波长 λ 为 632.8 nm,刻槽深度 h 分别为 150,300,450 和 600 nm 条件下,光栅 0 级衍射与 1 级衍射的衍射效率比 $R(h,\theta)$ 随 θ 的变化关系,如图 3 所示. 由图 3 可知,随着入射角 θ 的减小,曲线逐渐趋于平坦. 当入射角很小($\theta\approx 0$)时,无论刻槽深度如何, $R(h,\theta)$ 值基本不随 θ 的变化而变化. 因此,采用垂直入射方法可消除因入射角的误差引起的测量衍射效率比的误差.

2.2 刻槽深度的测量

由式(5)可知,采用单一波长垂直入射测量得到的 R 值将有多多个刻槽深度 h 与之对应,即反演计算出的 h 是一个多值量,如图 4 所示.

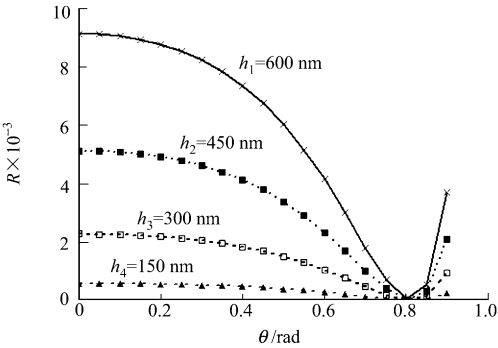


图 3 衍射效率比与入射角的关系
Fig.3 Relationship between diffraction efficiency ratio and incident angle

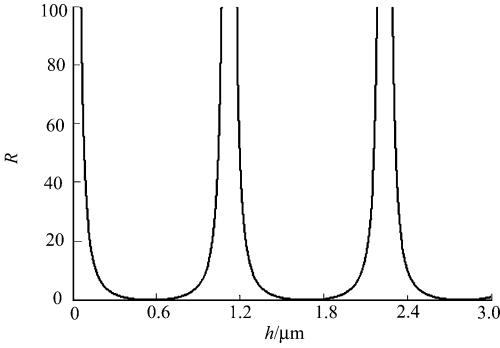


图 4 衍射效率比与刻槽深度的关系
Fig.4 Relationship between diffraction efficiency ratio and groove depth

为了获得单一函数值(唯一的刻槽深度 h),可采用双波长测量,利用式(5)的共同解来确定 h 值. 设采用波长 λ_1 和 λ_2 测量计算得到的解集分别为 $h_1(k),h_2(k),k=1,2,3,\cdots$, 令 $\delta(k)=|h_1(k)-h_2(k)|$, $k=1,2,3,\cdots$. 则当 $\delta(k)$ 取最小值时,有 $h_1(k)\approx h_2(k)$,即为真实刻槽深度. 最后取平均值,即 $h(k)=\frac{1}{2}[h_1(k)+h_2(k)]$.

以 632.8 nm 的 He-Ne 激光器和 650.0 nm 的半导体激光器为激光光源,采用的样品 1 和样品 2 是

已知刻槽深度(h)分别为 2.90,1.01 μm 的熔石英离子刻蚀浮雕矩形光栅. 测试数据及计算结果,如表 1 所示. 表 1 中: 样品 1($h=2.90\text{ }\mu\text{m}$) 在 632.8,650.0 nm 波长下的 R 值分别为 6.47,0.85; 样品 2($h=1.01\text{ }\mu\text{m}$) 在 632.8,650.0 nm 波长下的 R 值分别为 7.39,3.94.

从表 1 可看到,样品 1 的 $\delta(k)$ 最小值为 4.9 nm, 对应 $k=4$, 刻槽深度 $h=(2\ 897.1+2\ 902.0)/2=2\ 899.6\text{ nm}$; 样品 2($h=1.01\text{ }\mu\text{m}$) 的 $\delta(k)$ 最小值为 9.4 nm, 对应 $k=1$, 所以刻槽深度 $h=1\ 008.6\text{ nm}$. 以上实验测试结果表明,浮雕矩形光栅刻槽深度的实验测量精度优于 1%.

表 1 浮雕矩形光栅测试数据及计算结果

Tab.1 Test data and calculation results of relief rectangular grating

参数	样品 1					样品 2				
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
h_1/nm	999.9	1 632.3	2 264.7	2 897.1	3 529.5	1 003.9	1 601.7	2 234.1	2 866.5	3 498.9
h_2/nm	953.0	1 602.7	2 252.4	2 902.0	3 551.7	1 013.3	1 662.9	2 312.6	2 962.3	3 611.9
$\delta(k)/\text{nm}$	46.9	29.6	12.3	4.9	22.2	9.4	61.2	78.5	95.8	113.0

2.3 折射率的测量

根据式(4)可求得

$$\frac{n^2}{\sqrt{n^2-\sin^2\theta}}=\frac{\lambda}{2\pi h}\arccos(\frac{4-R\pi^2}{4+R\pi^2})+\frac{1}{\cos\theta}.$$

(8)

设 $B=\frac{\lambda}{2\pi h}\arccos(\frac{4-R\pi^2}{4+R\pi^2})+\frac{1}{\cos\theta}$, 代入式(8)并整理可得

$$n=\sqrt{(B^2\pm B\sqrt{B^2-4\sin^2\theta})/2}.$$

(9)

以 632.8 nm 的 He-Ne 激光作光源,当入射光入射角度为 45°时,实验测试刻槽深度为 2.90 μm 的熔石英浮雕矩形光栅的折射率,其 R 值为 0.188. 由此可算出 $\arccos(\frac{4-R\pi^2}{4+R\pi^2})=1.196+2m\pi$, ($m=1,2,3,4$) m 为周期序数. 代入式(8),(9)可得到的 B 和 n 值,如表 2 所示.

由表 2 可见, $n=1.467$ 与熔石英玻璃的折射率 1.458 5 最接近. 因此,与测量刻槽深度的方法类似,通过测量入射角度分别为 30°,45°和 60°的一组衍射效率比 R_i ,并计算相应的一组折射率 $n_i(m)$ (下标 i 为入射角). 取 $\delta n_{i,j}(m)=|n_i(m)-n_j(m)|$ 最小的一组 $n_i(m)$ 值即为浮雕矩形光栅的折射率测量值. 实验测量结果表明,当入射角为 30°,45°和 60°时,其平均折射率测量值精度优于 1%.

表 2 2.90 μm 样品的浮雕矩形光栅 B 和 n 的计算数据

Tab.2 Calculated data of relief rectangular grating refractive index n and B of 2.90 μm sample

参数	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
B	1.674	1.892	2.110	2.329
n	1.467, 0.807	1.726, 0.775	1.970, 0.758	2.206, 0.747

2.4 测量误差分析与讨论

根据间接测量误差函数按台劳级数展开,结合式(5)可得测量误差关系式为

$$\Delta h=\frac{\partial h}{\partial \lambda}\Delta \lambda+\frac{\partial h}{\partial R}\Delta R=\left[\frac{1+\arccos(\frac{4-R\pi^2}{4+R\pi^2})}{2\pi}\right]\Delta \lambda+\left[\frac{4\pi \lambda}{(4+R\pi^2)^2\sqrt{1-(\frac{4-R\pi^2}{4+R\pi^2})^2}}\right]\Delta R.$$

(10)

当测量误差 $\Delta\theta=0.1^\circ$, $n=1.458\ 5$, $\Delta n=10^{-7}$, $\lambda=632.8\text{ nm}$, $\Delta\lambda=0.1\text{ nm}$, $R=6.47$, $\Delta R=0.01$, $h=2\ 900\text{ nm}$, 可求得理论测量误差 $\Delta h=0.15\text{ nm}$, 但实验结果误差比理论误差大.

当入射角很小($\theta\approx 0$)时,无论刻槽深度多大, $R(h,\theta)$ 值基本不随 θ 的变化而变化,因此采用垂直入射方法测量刻槽深度可消除因入射角的误差引起的测量衍射效率比的误差. 用入射光入射角度为 30°,45°和 60°来测折射率时会对测量产生较大影响,但这些角度的正余弦值可精确求得.

激光光源不稳定也会给测量带来误差,虽然采用 0 级和 1 级衍射光强度比可大大减小激光光源不稳定引起的测量误差,但还不能完全消除其影响. 因此,实验通过测量多组数据,然后求取平均值来减小误差. 衍射光栅本身带来的影响,在衍射光栅的实际制作过程中存在系统误差和随机误差. 系统误差主要有深度误差、对位误差、线宽误差;而随机误差主要由元件台阶表面的粗糙程度引起的. 矩形光栅每

一单元的光栅层不是标准的矩形而近乎是梯形,各种面形光栅表面有不同的粗糙度,介质分布不均匀,可以利用光栅 0 级衍射和 1 级衍射的衍射光强比在一定程度上减少折射率的微小变化和光栅层内介质分布不均匀带来的误差. 它将光栅制作过程中存在的误差通过比值的形式大大减小,甚至基本抵消.

测量折射率时,入射角度分别为 30°,45°和 60°,而由于没有高精度的测角仪,入射角度误差较大,所以折射率的实验测量精度还不是很高.

3 结 束 语

利用矩形光栅 0 级衍射和 1 级衍射的衍射光强比,推导了矩形光栅刻槽深度和材料折射率的计算公式,并对其衍射效率与刻槽深度和入射角的关系进行分析. 对刻槽深度分别为 2.90,1.01 μm 的熔石英离子刻蚀矩形光栅进行测量,从实验上验证了测量方法的正确性,测量光栅刻槽深度和折射率的误差均小于 1%. 该测量法具有准确、高效、成本低,对光栅无损伤等优点. 由于计算无需其他光栅参数,所以在不太了解光栅参量的情形下,此法是测量矩形光栅^[10]的有效方法.

参考文献:

[1] 罗玉西,田晓晖. 测量光栅常数和波长的一种新办法[J]. 延安大学学报,1999,18(4):41-44.
[2] 高思田,王春艳,叶孝佑,等. 纳米技术与纳米计量[J]. 现代计量测试,2000,8(1):3-12.
[3] 邓广安,蔡志岗,张运华,等. 用衍射光栅和 CCD 测量透明材料折射率[J]. 光学学报,2004,24(1):77-83.
[4] 沈伟东,刘旭,叶辉,等. 确定薄膜厚度和光学常数的一种新方法[J]. 光学学报,2004,24(7):885-887.
[5] 刘晓林,梁培辉,张伟清,等. 利用 P-偏振光双面反射法测量多层膜的光学参量[J]. 光学学报,1998,18(5):407-409.
[6] 廖清君,王植恒,王磊,等. 模拟退火法在吸收薄膜的椭偏反演算法中的应用[J]. 光学学报,2002,22(4):484-487.
[7] 卢向东,傅克祥,王植恒,等. 椭偏法测光栅参量的可行性理论研究[J]. 激光杂志,2003,24(1):27-31.
[8] 李建龙,傅克祥,张丽娟. 用光栅的±1 级能量之比测量光栅参量[J]. 光学学报,2005,25(10):1324-1328.
[9] 巴音贺希格,齐向东,唐玉国. 矩形光栅衍射效率的一般表达式及其缺级现象[J]. 光电子·激光,2003,14(10):1021-1024.
[10] 于百英,庄其仁,阮思旭. 采用模压技术的聚合物矩形光栅制作象[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2007,28(2):151-154.

Determining the Relief Rectangular Grating's Parameters
with the Diffraction Efficiencies Ratio

CHEN Tang-rong, ZHAO Gen-chun,
DAI Wen-hai, ZHUANG Qi-ren

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the scalar diffraction efficiency formula, a new method of measuring the relief grating groove depth and the refractive index using the diffraction intensity ratio of the zero-order and the first-order is proposed. The relationship between diffraction efficiency and groove depth as well as angle of incidence was analyzed. By measuring the groove depth of 2.90 and 1.01 μm of fused silica ion etching rectangular grating, experimentally verified the correctness of the measurement method. The results show that the rectangular grating groove depth and, the refractive index can be determined by measuring the diffraction intensity ratio of zero-order and first-order and the relative error is less than 1%.

Keywords: rectangular grating; diffraction efficiency ratio; laser diffraction; grating parameters; diffraction intensity ratio