

文章编号: 0253-2239(2006)11-1605-4

对正负一级能量之比测量光栅参量方法的改进

张丽娟 卢向东 欧伟英

(桂林电子科技大学电子工程系, 桂林 541004)

摘要: 提出利用同一波长的入射光在双面入射时两个能量之比的比值对光栅的参量进行测量, 进一步提高准确度。首先从理论上比较正弦面形光栅在单一面入射及双面入射时各种衍射效率对光栅表面粗糙度的敏感程度; 然后模拟测量出该正弦面形光栅在双面入射情况下的光栅参量; 最后成功反演出体积相位全息光栅的三个参量, 其测量结果为 $0.080\ \mu\text{m}$, $1.452\ \mu\text{m}$, $20.5\ \mu\text{m}$ 准确度比单一面入射情况 ($0.080\ \mu\text{m}$, $1.451\ \mu\text{m}$, $20.1\ \mu\text{m}$) 时要高。同时该法继承了原来方法的无损伤、操作简便、可重复、易推广、成本低等优点。

关键词: 衍射与光栅; 光栅参量; 正反入射; 衍射效率之比; 正单纯形法

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Improvement on Measuring Grating Parameters with Diffraction Orders of $m = \pm 1$ Efficiencies Ratio

Zhang Lijuan Lu Xiangdong Ou Weiyang

(Department of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

Abstract: A method to measure the grating parameters with the incident efficiencies ratio from both sides of the grating with the same wavelength is proposed. The proposed method has a higher precision than the original approach with the diffraction orders of $m = \pm 1$ efficiencies ratio from one side of the grating. Firstly, by comparing the sensitivity of diffraction efficiency ratio to surface roughness under the condition of one side incidence and two-side incidence, it is found the former is more sensitive than the latter; secondly, the sine surface grating parameters are simulated for two-side incidence; finally, the volume phase holographic grating parameters are obtained experimentally more accurately. Meanwhile, the new method retains the advantage of the original method, such as no damage, simplicity and low cost.

Key words: diffraction and grating; grating parameters; two-side incident; diffraction efficiency ratio; normal simple algorithm

1 引言

光栅参量的测量是光栅应用的一个重要问题, 随着优化算法的日益完善, 具有无损伤, 无扰动, 成本低等优点的间接测量方法^[1]已引起人们的重视, 如椭偏法^[2,3]、透射光谱法^[4~6]等。李建龙等^[7]提出了利用光栅的正负一级的能量之比来测量光栅参量, 为光栅参量的测量开辟了新途径。该方法较成功地解决了由于实际光栅表面的粗糙度、周期结构的细微畸变、光栅层介质分布不均匀等随机误差^[8]带来的透射光谱的测量误差。本文拟采用衍射光栅

的双面入射方法, 进一步完善文献[7]所提出的方法, 同样, 它仍然保持了诸如实验设备简单易行、采集数据较少、实验数据稳定且对光栅无损伤等优点。

2 理论分析

当一束单色光垂直入射到理想对称光栅表面时, ± 1 级衍射效率是相等的; 当单色光束以一定角度入射时, ± 1 级衍射效率的比值为一定值。但是实际光栅表面的粗糙度、周期的细微畸变以及折射率分布的非均匀都会引起 ± 1 级衍射效率的偏

离,但这种偏离通常同方向,因而削弱了 T_{+1}/T_{-1} (二者分别表示 ± 1 级衍射效率)的改变,从而在一定程度上保证我们在实验中测得的 ± 1 级效率之比与理想光栅的 ± 1 级的效率之比的差别很小,光栅单一级次的衍射效率在处理刚才提及的偏差时不及 T_{+1}/T_{-1} 理想。衍射效率与光栅表面粗糙度的敏感度的关系为

$$S = |T_m - T_r|/T_r,$$

其中 T_m 代表测量值, T_r 代表光栅表面光滑情况下(即理想情况下)的计算值。

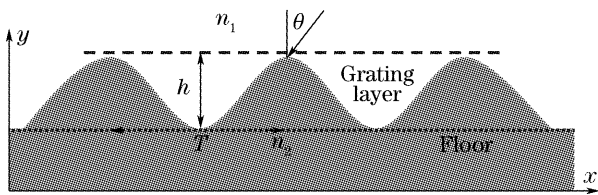


图 1 正弦光栅模型
Fig. 1 Sine surface grating model

在图 1 中所示的正弦面型浮雕光栅的各参量分别为:光栅周期 $T=1.50\mu\text{m}$,光栅的浮雕部分厚

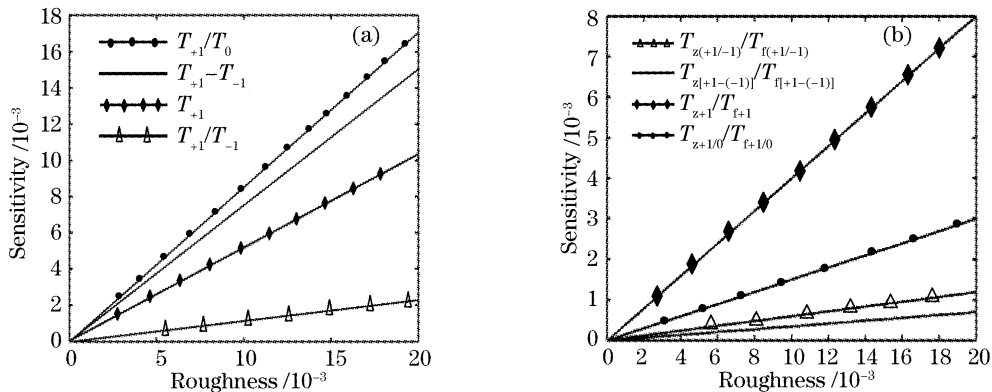


图 2 各种衍射效率在单面(a)和双面(b)入射时对光栅表面粗糙度的敏感程度

Fig. 2 Sensitivity of every kind of diffraction efficiencies to the surface roughness under the condition of single- (a) and two-side (b) incidence

在图 2 中,我们通过在正弦面型光栅的表面加上不同偏差的高斯噪声来模拟光栅表面的粗糙度。从图 2(a)可知,同一条件下,正负一级的能量之比对光栅表面的粗糙度最不敏感, T_{+1}/T_{-1} 的相对误差仅为表面粗糙度的 $1/10$ 左右。从图 2(b)可以看出,在各种衍射效率形式中,光栅双面入射时正负一级的衍射效率之差的比值在处理光栅的表面存在的粗糙度上是最不敏感,略逊色的是正负一级的衍射效率之比的比值,它的相对误差是光栅表面粗糙度的 $1/20$ 左右,然后依次是正一级与零级的之比的比值,接着是单一级次衍射效率在双面入射情形下的比值。综合考虑单面入射与双面入射情况下处理光

度 $h=0.70\mu\text{m}$,入射层的介质折射率 $n_1=1.00$,光栅层的折射率 $n_2=1.453$ 。

当入射光(TE 波)以 35° 入射角入射到光栅在单一面时,正负一级能量之差($T_{+1}-T_{-1}$),正一级的能量(T_{+1}),正一级与零级的能量之比(T_{+1}/T_0)和正负一级能量之比(T_{+1}/T_{-1})对光栅表面粗糙度的敏感度曲线如图 2(a)所示。

为了便于得出各种衍射效率形式在双面入射时的比值对光栅表面的粗糙度的敏感度,现用数值模拟的方法从理论上模拟出它们随表面粗糙度变化的曲线[见图 2(b)]。其中,下角标 z, f 分别代表正面入射和反面入射, $T_{z(+1/-1)}/T_{f(+1/-1)}$ 为正面入射时正负一级能量比与反面入射时正负一级能量比的比值; $T_{z(+1-(-1))}/T_{f(+1-(-1))}$ 为正面入射时正负一级能量之差与反面入射时正负一级能量之差的比值; T_{z+1}/T_{f+1} 为正面入射时正一级能量与反面入射时正一级能量之比; $T_{z+1/0}/T_{f+1/0}$ 为正面入射时正一级与零级能量比与反面入射时正一级与零级能量比的比值。

栅的表面粗糙度的能力,我们选择双面入射的正负一级的衍射效率之比的比值对光栅参量进行数值计算,模拟反演以验证其可行性。

3 模拟计算

从以上分析可以看出,在同一入射角情形下,虽然光栅表面粗糙程度不同,但 $T_{z(+1/-1)}/T_{f(+1/-1)}$ 随波长的变化基本上稳定的,变化非常小。我们在入射光波(TE 波)以 6° 角双面入射理想光栅(其参量为 $n_1=1.00, T=1.51\mu\text{m}, n_2=1.453, h=0.70\mu\text{m}$)的透射光谱图上加不同偏差(分别为 $0.05, 0.10, 0.15$)的高斯噪声来模拟实验的测量曲

线,然后在模拟曲线上取五个点(波长分别为 632.8 nm, 514.5 nm, 496.5 nm, 488.0 nm, 476.5 nm),并将其代入正单纯形算法^[9]进行参量反演。

整个的模拟计算过程主要包括正演与反演两个部分:首先以反射透射系数阵(RTCM)^[10]算法为基础算出不同波长情况下的 $T_{z(+1/-1)}/T_{f(+1/-1)}$,进一步在上面加入不同偏差的高斯噪声来模拟 $T_{z(+1/-1)}/T_{f(+1/-1)}$ 的实验光谱曲线,然后从模拟光谱曲线上取若干个点,用适当的优化算法进行参量反演。反演进程用评价函数来评定,当评价函数达到设定的一个较小的值时,即可得出光栅参量。用最小二乘法构造的评价函数为

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_{ci} - \eta_{gi})^2, \quad (1)$$

式中 N 为所选点的个数, η_c 为衍射效率测量值(代表 $\eta_{ci}, i = 1, 2, \dots, N$), η_g 为由光栅参量的尝试解得到的衍射效率值(代表 $\eta_{gi}, i = 1, 2, \dots, N$)。在逐步迭代过程中, η_c 保持不变, η_g 不断变化。

我们假定光栅的周期已知,其他参量反演初始点为: $n_1 = 0.90, n_2 = 1.35, h = 0.60 \mu\text{m}$,反演结果见表 1。可以看出,随着标准偏差的增大,所得参量误差增大,但仍可使各参量的反演值接近真实值,其误差一般小于模拟测量的标准偏差。当 $\sigma = 0.15$ 时,这时光栅的面型可能已经不再是正弦形,但我们仍反演出了一个光栅参量,这完全可以由图 2 得到解释,因为 $T_{z(+1/-1)}/T_{f(+1/-1)}$ 能大大抑制光栅的表面粗糙度所带来的测量误差。也就是说 $\sigma = 0.15$ 的表面粗糙度传递给 $T_{z(+1/-1)}/T_{f(+1/-1)}$ 时,测量偏差已经非常小,这时仍可以认为光栅的表面面型近乎标准正弦面型,因而从数值模拟上证明了该方法的有效性和可靠性。

表 1 双面入射光栅时参量的模拟测量结果

Table 1 Results of the parameters of the grating by the calculation

Standard deviation	n_1	n_2	$h / \mu\text{m}$
0.05	1.000	1.452	0.699
0.10	1.002	1.453	0.696
0.15	0.998	1.451	0.702

4 实验与结论

我们所采用的实验装置图如文献[7]中的图 1 所示。由于我们没有正弦面形光栅,为了从实验上检验理论的正确性,我们只好利用体积相位全息光

栅。在上述理论的指导下测量了一块基板为玻璃,记录材料为重铬酸盐明胶的体积相位全息光栅。实验前用椭圆法测量出了光栅层的主折射率,用国产的精密膜厚仪测量了光栅厚度,并推算出了该光栅的调制折射率,利用测量一级衍射角的方法较准确地测出光栅的周期 T 。

各参量值分别为 $n_0 = 1.453, \Delta n_1 = 0.08, H = 20.8 \mu\text{m}, T = 1.72 \mu\text{m}$, n_0, n_1 分别为体积相位全息光栅的主折射率和调制折射率, H 为光栅层厚度。假定周期 T 已知,我们只反演光栅的三个参量 $n_0, \Delta n_1, H$ 。

实验中,我们选用同一入射角(6°)五种不同的波长在双面入射时 $T_{z(+1/-1)}/T_{f(+1/-1)}$ 值,这五种波长分别为 632.8 nm, 514.5 nm, 496.5 nm, 488.0 nm, 476.5 nm。对每一种情形测量了三次,然后求出它们的平均值作为我们的测量值,实验所用的装置见文献[5],测量的结果见图 3,反演结果见表 2。

表 2 单双面入射时的光栅参量的测量值

Table 2 Measured result of parameters under two conditions

Measured results	Δn_0	n_1	$H / \mu\text{m}$
Real parameters	0.08	1.453	20.8
Two-side incidence measuring parameters	0.080	1.452	20.5
Single-side incidence measuring parameter	0.080	1.451	20.1

在图 3 中黑圆实点表示 6° 入射角下,波长为 632.8 nm, 514.5 nm, 496.5 nm, 488.0 nm, 476.5 nm 时的 $T_{z-1/+1}/T_{f-1/+1}$ 的测量值,用实线连接,虚线表示理论的衍射效率曲线。可以看出,测量值与理论值的偏差较小。在反演的过程中 $n_0, \Delta n_1, H$ 的反演起始点分别为: $1.20 \mu\text{m}, 0.05 \mu\text{m}, 18 \mu\text{m}$ 。在实际的计算过程中,只要将反演步长乘以一个呈高斯分

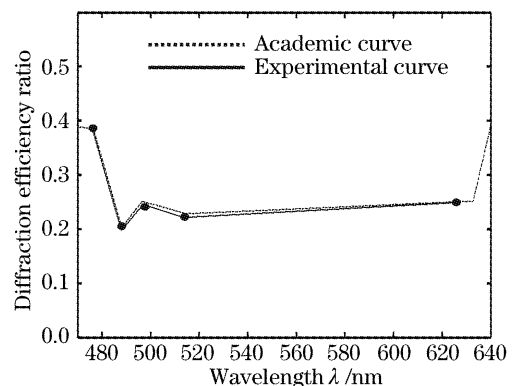


图 3 6° 角双面入射光栅时衍射效率随波长的变化

Fig. 3 Diffraction efficiency as a function of wavelength when the incident angle is 6° under the condition of two-side incidence

布的随机数,再严格控制收敛条件,可以将起点设得较远,以便减少对初始值的依赖性。这样,即使在对光栅了解不多的情况下,也能很快地搜索到一组最佳值,大大减少了因初始值和搜索范围设得不当所带来的误差。

从表 1 可以看出,采用该法已较准确地反演出体积相位全息光栅的参量,反演所得的各光栅参量(表 2 中第 2 行)精度比文献 7 中的测量结果(表 2 中第 3 行)的精度要高。

5 结 论

从理论上研究了采用双面入射时的透射光谱和单一面入射时的透射光谱对光栅表面粗糙度的敏感程度,得出后者比前者要敏感的结论;在实验中用双面入射时的透射光谱成功测量出一种体积相位全息光栅参量,结果表明其测量精度比单一面入射时要高。同时该法继承了单一面入射时透射光谱测量光栅参量方法的准确、高效、可重复、成本低、对光栅无损伤等优点。限于篇幅,文中只反演出了光栅的三个参量,其他光栅参量也可以利用类似的方法反演出来。

参 考 文 献

- Liao Qingjun, Whang Zhiheng, Wang Lei *et al.*. Ellipsometric data inversion of absorbing film by simulated annealing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 684~687 (in Chinese)
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**(6): 684~687
- Lu Xiangdong, Fu Kexiang, Wang Zhiheng *et al.*. Study of measuring gratings parameters by ellipsometric method in theory [J]. *Laser J.*, 2003, **24**(1): 29~31 (in Chinese)
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): 29~31
- Ma Jianyong, Fu Kexiang, Whang Zhiheng *et al.*. Inversion of gratings parameters by ellipsometric method in theory[J]. *Laser J.*, 2003, **24**(5): 42~44 (in Chinese)
麻健勇,傅克祥,王植恒等. 基于模式理论光栅椭偏参量反演的数值模拟[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(5): 42~44
- Zhang Lijuan, Fukexiang, Ma Jianyong *et al.*. The feasibility of measuring grating parameters with the transmission spectrum method[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 165~168 (in Chinese)
张丽娟,傅克祥,麻健勇等. 透射光谱法测光栅参量的可行性[J]. *激光技术*, 2005, **29**(2): 165~168
- Deng Jian, Zhong Fangchuan, Qing Ling *et al.*. Theoretical analysis of characteristics of high efficiency high resolution transmission spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 647~653 (in Chinese)
邓健,钟方川,覃岭等. 高效高分辨率大面积透射光栅谱仪特性的理论分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 647~653
- Zhang Yibing, Liu Zhiguo, Wang Jiang *et al.*. The measurement of fiber-grating transmission spectra[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(1): 31~34 (in Chinese)
张艺兵,刘志国,王江等. 光纤光栅透射谱线的测量[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(1): 31~34
- Li Jianlong, Fu Kexiang, Zhang Lijuan *et al.*. Determining the grating's parameters with the diffraction orders of efficiencies ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1324~1328 (in Chinese)
李建龙,傅克祥,张丽娟等. 用光栅的正负一级能量之比测量光栅参量[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1324~1328
- Zhang Haitao, Gong Mali, Zhao Dazun *et al.*. Design and error analysis of trapeziform grating for high density optical disk storage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 92~98 (in Chinese)
张海涛,巩马理,赵达尊等. 高密度光盘存储中的梯形光栅设计和误差分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 92~98
- Lu Xianfeng. *The Foundation of the Most Optimized Method Application* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003. 45~48 (in Chinese)
卢险峰. 最优化方法应用基础[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003. 45~48
- Fu Kexing, Wang Zhiheng, Zhang Dayue *et al.*. A modal theory and recursion RTCM algorithm for gratings of deep grooves and arbitrary profile[J]. *Science in China (A)*, 1999, **42**(6): 636~645 (in Chinese)
傅克祥,王植恒,张大跃等. 大深度任意剖面形状光栅的模式理论和 RTCM 递推算法[J]. *中国科学(A 辑)*, 1999, **42**(6): 636~645