

文章编号 1004-924X(2017)12-3012-08

闪耀透射光栅衍射规律的分析 and 验证

黄元申^{1,2,3}, 过军军^{1,2*}, 盛 斌^{1,2}

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 上海市现代光学系统重点实验室 教育部光学仪器与系统工程中心, 上海 200093;
3. 上海光学仪器研究所, 上海 200093)

摘要: 基于标量理论研究了不同槽形角, 不同刻线密度的透射式闪耀光栅对使用波段的影响, 推导了闪耀透射光栅的衍射光能量分布规律。分析证明了透射闪耀光栅在衍射能量最强方向上衍射光的衍射角与入射光的入射角之间的关系满足 Snell 定律。给出了入射角、衍射角与槽形角之间的关系式, 研究了不同刻线密度和槽形角条件下衍射光能量分布的规律。对闪耀透射光栅进行了测量和比较, 结果表明: 已有闪耀透射光栅测量的结果与理论计算数据相吻合。制备了聚二甲基硅氧烷(PDMS)可调谐闪耀透射光栅, 应用研究的理论公式测量了该闪耀透射光栅在拉伸与自由状态下的闪耀波长和光栅刻线密度, 结果显示其波长测量误差在 5 nm 以内。拟合了光栅的等效槽形, 验证了实时监测 PDMS 光栅槽形和刻线密度随拉力大小变化的规律。

关键词: 透射光栅; 闪耀光栅; 衍射效率; 闪耀角; 闪耀波长

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3012

Analysis and verification of diffraction rules of blazed transmission grating

HUANG Yuan-shen^{1,2,3}, GUO Jun-jun^{1,2*}, SHENG Bin^{1,2}

- (1. School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
 2. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Optical Instrument and Systems Engineering Centre of the Ministry of Education, Shanghai 200093, China;
 3. Shanghai Institute of Optical Instruments, Shanghai 200093, China)
- * Corresponding author, E-mail: 157670504@usst.edu.cn

Abstract: Based on the scalar theory, the influence of the blazed transmission grating with different groove angles or different groove densities on the used wavelength was researched and the energy distribution of the diffraction light of the blazed transmission grating was deduced. It was concluded that the relationship between the diffraction angle and the incident angle of the diffracted grating in the diffraction direction with the strongest energy could satisfy the Snell's law. The relationship among the angle of incidence, diffraction angle and groove angle was given, and the energy distribution law of the

收稿日期: 2017-07-10; 修订日期: 2017-09-18.

基金项目: 国家重点研究发展计划资助项目 (No. 2016YFB1102303); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61378060); 国家重大仪器专项 (No. 2016YFF0101904)

diffracted light at different groove densities and groove angles was studied. Then, the blazed transmission gratings were measured. It is shown that the characteristics of the existing blazed transmission gratings are consistent with that of theoretical calculation. A polydimethylsiloxane (PDMS) period-tunable blazed transmission grating was fabricated. Then, the blazed wavelength and groove density of the PDMS blazed transmission grating were measured in both stretched and free state by using the deduced formula. The results show that the measurement error of the wavelength is within 5 nm. The equivalent groove profile of the grating was fitted, which verifies the law that groove profile and groove density of the PDMS grating are changed with the tension changes in the real-time monitoring.

Key words: transmission grating; blazed grating; diffraction efficiency; blazed angle; blazed wavelength

1 引言

光谱分析仪器是分析物质成分、探索宇宙奥秘、开发大自然的常用仪器^[1]。光栅光谱仪是应用最广的光谱分析仪器,具有高光谱分辨率和高信噪比的特点^[2]。大多数光谱仪采用反射光栅作为分光元件,但是某些特定场合如国防中敌方激光信息探测^[3]、核物理中对光束线光源进行能量标定和分辨率测量^[4]等,采用透射型光栅作为分光元件。与反射光栅相同,透射光栅的槽形、刻线密度和入射光决定了光栅衍射能量的分布。

传统光栅一般采用机械刻划或者全息记录法在平面或者凹面上加工出具有一定形状的刻槽。随着光通信技术的发展,特殊类型光栅的研究越来越多。2005年,陈水良等人使用硅微细加工技术制作了可以改变周期的光栅^[5]。2006年,叶超等人使用 PDMS 制作了可变间距光栅^[6]。2012年,黄翀等人设计了一种可转换光栅常数的液晶光栅^[7]。PDMS 是在模板技术复制微结构中常用的弹性高分子材料,具有低玻璃化温度、低表面能、高透气性、极佳的绝缘性和稳定性等优良特性^[8]。姜兰钰等人制备了 PDMS 光盘沟槽微结构薄膜,对薄膜的润湿性各向异性进行了研究,并用 PDMS 薄膜精确地复制了光盘沟槽结构^[8-9]。2012年汪静等人使用 PDMS 薄膜制作了周期可调光栅,其衍射现象显著,对此弹性光栅薄膜进行拉伸,光栅常数可连续调制,且光栅条纹无可视畸变^[10]。随着 PDMS 周期可调光栅研究的成熟,其衍射效率分析变得尤为重要。

光栅衍射效率分析可以采用矢量衍射理论^[11-12],也可以应用近似的标量衍射理论。由于

光谱仪衍射光栅的周期相对于使用波段足够大^[13],因此一般采用简洁直观和物理意义明确的标量衍射理论进行分析。本文使用标量理论研究了透射式闪耀光栅的槽形角和刻线密度对于其使用波段的影响,实验制作了玻璃基片树脂材料刻槽的透射闪耀光栅,测试了光栅衍射效率的变化趋势;自制 PDMS 材料可调谐闪耀透射光栅,利用研究的闪耀透射光栅衍射规律,测试了透射式 PDMS 光栅一维拉伸情况下周期和衍射效率的变化,分析了槽形变化的规律。

2 闪耀透射光栅的理论分析

2.1 正入射时透射光栅的闪耀波长计算

闪耀透射光栅如图 1 所示,其光栅槽形为直角三角形,衍射面的宽度为 a ,槽形角为 φ ,光栅材料折射率为 n_R ,光栅周期为 d , N 为光栅面法线, N' 为光栅衍射面的法线。当光束正入射时,即入射角 $\theta_i=0$ 时,一级衍射角为 θ_d ,反映多缝干涉主极大的光栅方程为:

$$d \sin \theta_b = m \lambda, m=0, \pm 1, \pm 2 \cdots, \quad (1)$$

其中 θ_b 为 m 级次的衍射角。

由标量衍射理论知道,光栅衍射场是单缝衍射和多缝干涉共同作用的结果。单缝衍射因子 $(\sin \alpha / \alpha)^2$ 中的位相 $\alpha = k \Delta$,其中空间角频率 $k = 2\pi / \lambda$,光程差 Δ 为单缝孔径中心与边缘在衍射方向上的光程差,由图 1 得 $\Delta = (a/2) \times [\sin(\varphi + \theta_d) - n_R \sin \varphi]$ 。在衍射因子取得极大时衍射方向上的衍射波长即为闪耀波长,对应的衍射角为闪耀角。衍射因子取极大值的条件为: $\alpha \rightarrow 0$ 时, $(\sin \alpha / \alpha)^2 \rightarrow 1$,即:

$$\Delta = (a/2) \times [\sin(\varphi + \theta_b) - n_R \sin \varphi] = 0, \quad (2)$$

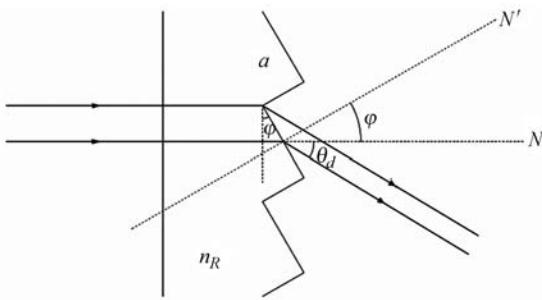


图 1 透射光栅正入射条件下的衍射光路图

Fig. 1 Diffraction optical path of transmission grating in normal incidence

或:

$$n_R \sin \varphi = \sin(\varphi + \theta_B). \quad (3)$$

光栅的直角三角形槽可以看成一个小棱镜, 在正入射条件下, 满足 Snell 定律时有:

$$n_R \sin \varphi = \sin(\varphi + \theta_B), \quad (4)$$

其中 θ_B 为闪耀角.

忽略不同光频在介质中传播速度的差异, 也就是说在波长范围不是很大的条件下, 比较式(3)和式(4)发现闪耀透射光栅的闪耀条件是: 正入射时, 满足 Snell 定律的衍射方向上的衍射波长就是闪耀波长, 对应的衍射角为闪耀角 θ_B , 再结合式(1)就可以计算出该级次 m 的闪耀波长 λ_B . 在 Littrow 条件下, 闪耀反射光栅的闪耀角等于槽形角, 而闪耀透射光栅的闪耀角则不等于槽形角 φ .

已知一块闪耀透射光栅 A, 其槽形角 $\varphi = 31.7^\circ$, 光栅刻线密度为 300 g/mm, 光栅基底材料为 Schott 公司的玻璃 B270, 光栅槽形材料选用与玻璃 B270 匹配的环氧树脂, 二者折射率非常接近. 虽然折射率随波长改变, 但查 Schott 公司折射率表发现在 600~1 800 nm 波段玻璃 B270 折射率的改变量在 7% 之内, 而且变化率基本线性. 为了简化运算, 取平均折射率 1.514 进行计算. 利用式(1)和 $\Delta = (a/2) [\sin(\varphi + \theta_B) - n_R \sin \varphi]$, 计算正入射时不同波长衍射光的归一化相对光强, 结果图 2 所示.

由图 2 可知, 从短波到长波相对衍射光强先增后减, 在波长 $\lambda_B = 1 195.0$ nm 时相对衍射强度达到最大, 这个波长就是闪耀波长, 对应的单缝衍射因子为 1, 且满足 Snell 定律公式(4); 相对强度曲线并不是关于闪耀波长对称的, 波长小于闪耀波长时相对光强曲线变化更陡一些, 而大于闪耀波长时更平缓.

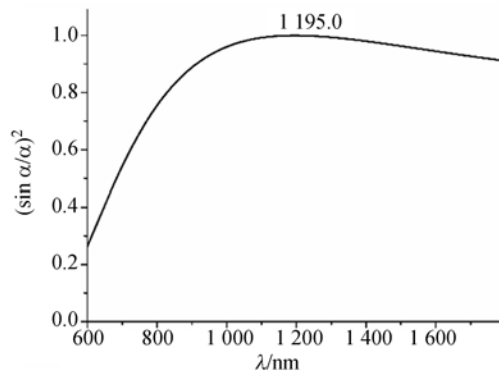


图 2 闪耀透射光栅正入射时不同波长 λ 的衍射光光强变化曲线图

Fig. 2 Variation of efficiency with wavelengths of blazed transmission grating for normal incidence

2.2 斜入射时闪耀透射光栅的衍射极大方向

如图 3 所示, 入射角 $\theta_i \neq 0$, θ_d 为光线的衍射角, 则衍射孔径中心与边缘的光程差为 $\Delta = (a/2) \times [\sin(\varphi + \theta_d) - n_R \sin(\varphi + \theta_i)]$. 当入射角 θ_i 和衍射角 θ_d 满足光程差 $\Delta = 0$ 时, 为衍射极大的方向, 即:

$$\sin(\varphi + \theta_d) - n_R \sin(\varphi + \theta_i) = 0. \quad (5)$$

不难看出, 式(5)满足 Snell 定律, 也就是说斜入射时, 满足 Snell 定律折射方向上的衍射光波具有最大的相对衍射光强, 此时的入射角和衍射角可以通过光栅方程求得. 光栅方程为:

$$d(n_R \sin \theta_i - \sin \theta_d) = m\lambda. \quad (6)$$

针对闪耀透射光栅 A, 选择 $\lambda = 1 100$ nm, 对入射角进行扫描, 利用式(5)和式(6)计算出单缝

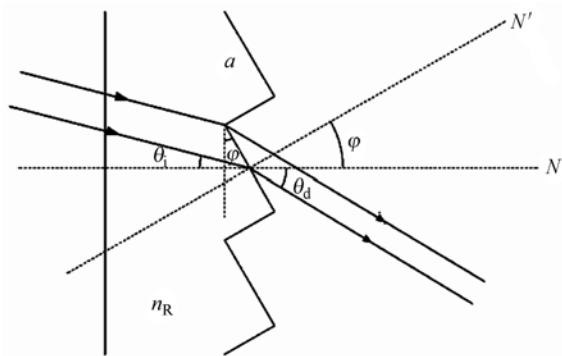


图 3 光线以角度斜入射时衍射光路图

Fig. 3 Diffraction optical path with an incident angle of θ_i

衍射因子 $(\sin \alpha/\alpha)^2$ 和入射角 θ_i 的对应关系,如图 4 所示。

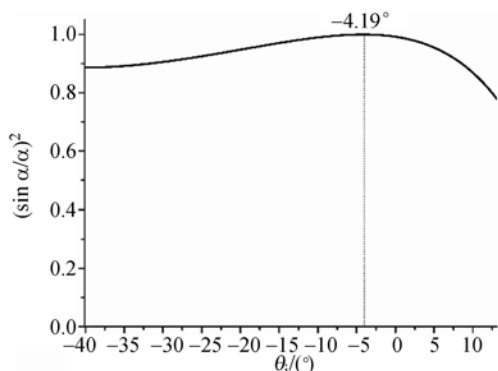


图 4 光线斜入射时波长为 1 100 nm 衍射光的相对光强与入射角的关系曲线

Fig. 4 Relationship between relative intensity and incident angle θ_i at wavelength of 1 100 nm

由图 4 可知,入射角从 -40.8° 到 13.1° 的变化过程中,相对强度先增后减,在入射角为 -4.19° 时相对衍射强度达到最大。这个角度对应着衍射能量最强的方向,对应的单缝衍射因子为 1,且满足 Snell 定律公式(4);相对强度曲线并不是关于极大光强入射角对称的,而是小于该角度时相对光强曲线变化更平缓,而大于该角度时更陡。

2.3 光栅衍射光强极大的光波长范围

对于一块特定的闪耀透射光栅,并非每个波长都可以通过改变入射角使得衍射光波方向满足 Snell 定律,也就是衍射光强极大方向。因此对于一块给定参数的闪耀透射光栅,具有衍射光强极大的光线是有一个范围的。本文利用式(5)和式(6)来计算闪耀透射光栅衍射光强极大的光波长范围。

若闪耀透射光栅的槽形角为 $\varphi = 10^\circ, 20^\circ, 31.7^\circ$,光栅刻线密度为 300 g/mm、介质折射率 $n=1.514$ 。当入射角 θ_i 增大到在光栅槽面上发生全反射时,无论如何改变光波波长都无法取得衍射光强极大,这个临界入射角 θ_i 为截止入射角。根据 Snell 定律,此时 $n_R \sin(\varphi + \theta_i) = 1$,很显然,截止入射角跟介质的折射率 n_R 和槽形角 φ 有关。

如图 3 所示,若定义入射光线和衍射光线矢量在光栅法线 N 上方为负,下方为正时,那么从图 5 看出,当槽形角 φ 一定时,随着角度从负变至

正,相对衍射光强极大波长 λ 先减小后变大,在 $\theta_i = -\varphi$ 时,即沿着光栅槽面法线 N' 方向入射时,衍射光强极大波长 λ 达到最小值;当入射角 θ_i 为截止入射角时,即刚发生全反射时波长 λ 达到最大,且越接近截止入射角相对衍射光强极大波长的变化率就越大。

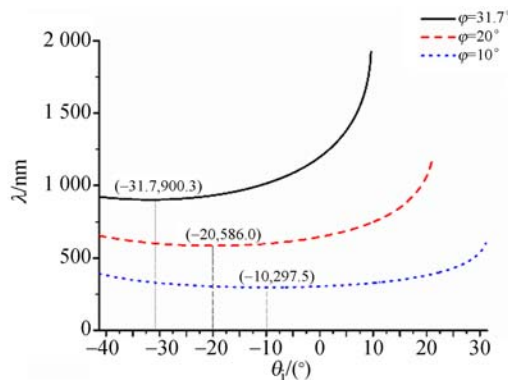


图 5 不同槽形角下入射角 θ_i 与对应衍射光强极大的波长 λ

Fig. 5 Variation of wavelength λ with corresponding incident angle θ_i with maximum diffraction efficiency and different groove angles

对于不同的槽形角 φ ,槽形角越大的光栅,其截止入射角 θ_i 越小,而衍射光强极大的波段范围越大;反之槽形角越小,而衍射光强极大的波段范围越小。对于相同的入射角(设此时 λ 都有取值),槽形角 φ 越大,光栅衍射光强极大的波长 λ 越大。

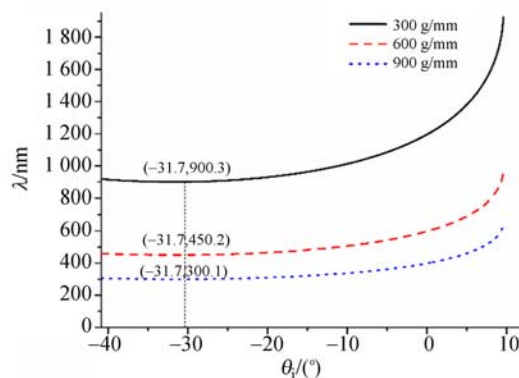


图 6 不同的刻线密度下入射角 θ_i 与对应衍射光强极大的波长 λ

Fig. 6 Variation of wavelength λ with corresponding incident angle θ_i with maximum diffraction efficiency and different groove densities

如图 6 所示,若闪耀透射光栅的刻线密度为

300,600,900 g/mm, 介质折射率为 1.514, 槽形角 $\varphi=31.7^\circ$ 。同理, 根据临界截止入射条件, 截止入射角 θ_c 与介质折射率和槽形角有关。当光栅刻线密度一定时, 随着角度从负变至正, 相对衍射光强极大波长 λ 先减小后变大, 在 $\theta=-\varphi$ 时, 即沿着光栅槽面法线 N' 方向入射时, 衍射光强极大波长 λ 达到最小值; 当入射角 θ 为截止入射角时, 即刚发生全反射时波长 λ 达到最大值, 且越接近截止入射角相对衍射光强极大波长的变化率越大。

对于不同的光栅, 刻线密度越大, 光栅衍射光强极大的波长范围越小; 反之, 刻线密度越小, 衍射光强极大的波长范围越大。

入射角相同时(设此时 λ 都有取值), 刻线密度越大的光栅衍射光强极大的波长 λ 越小。

3 实验验证

3.1 正入射时透射光栅的闪耀波长理论验证

实验取一块闪耀透射光栅, 其光栅参数与 2.1 部分正入射理论分析的光栅 A 一致。输入光源采用 SuperK EXTREME 超连续光源, 波段为 500~900 nm 和 1 100~1 500 nm。在 900~1 100 nm 采用卓立汉光的单色仪作为输入光源。光功率计采用 Thorlabs 公司 PM100D 光功率计, 配备不同的探头可检测可见光和红外波段的光功率。为了检测准确, 红外测量时采用 LabBang 公司型号为 LAB-IR-1201 的红外显卡, 显示波段为 800~1 600 nm。为了使探测器的光强读数更精

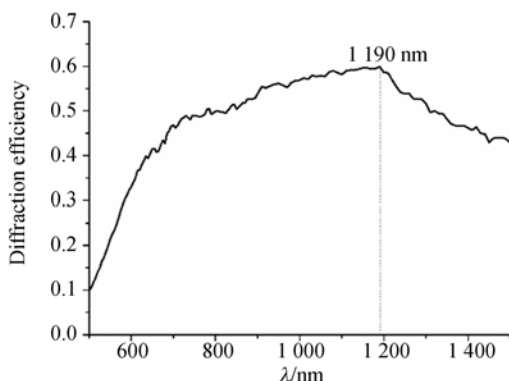


图 7 被测闪耀透射光栅正入射时不同波长的衍射效率曲线

Fig. 7 Variation of diffraction efficiency with wavelength of tested blazed transmission gratings in normal incidence

确, 应尽量使光束全部进入探测器。

按照图 1 方式, 单色仪选用不同波长的光波正入射到光栅刻槽面的背面, 探测器检测光栅 -1 级衍射光光强, 与测得的入射光光强比较计算出衍射效率, 结果如图 7 所示。由图可知, 随着入射波长的增加, 正入射时的衍射效率先增加后减小, 在波长 1 190 nm 处达到最大值, 与理论计算值 1 195.0 nm 基本吻合。测量波长间隔为 10 nm, 测量结果是可信的。

3.2 斜入射时闪耀透射光栅衍射极大方向的验证

实验取与理论计算光栅参数相一致的实际光栅, 测试其转角和一级衍射效率的关系。采用 SuperK EXTREME 输出的 1 100 nm 光作为输入光源, 光功率计采用 Thorlabs 的 PM100D 光功率计配备硅光电池探头。红外显卡的选择同 3.1 部分相同。

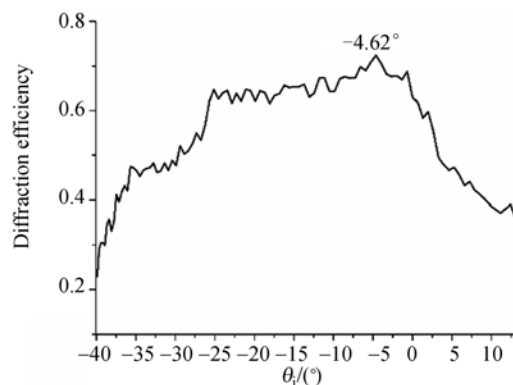


图 8 1 100 nm 波长下, 被测闪耀透射光栅入射角与衍射效率的关系

Fig. 8 Variation of diffraction efficiency of tested blazed transmission gratings with incident angle at wavelength of 1 100 nm

将光栅背面置于转台回转中心, 使光线从光栅背面以一定角度入射, 考虑光的折射, 计算对应的光栅入射角。测量不同入射角对应的入射光光强和对应的 -1 级衍射光光强, 计算出的衍射效率曲线如图 8 所示。光栅入射角从 -40° 增加到 13° 的过程中, 光栅衍射效率先增加后减小, 在 -4.62° 时光栅衍射效率达到最大。从入射角步长均小于 0.66° 分析, 实验值与图 4 理论值的差值为测量误差, 验证了斜入射时闪耀透射光栅衍射极大的方向规律。

4 应用闪耀透射光栅衍射规律测试 PDMS 光栅等效槽形

聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为有机硅材料中的一种,因具有弹性和透明的特征而在可调光学领域得到了应用^[14]。

光栅参数测量有诸多方法,其中衍射测量法不确定度最小^[15],基于显微白光干涉术也是一种较精确的测量方法^[16]。为简便起见,本文通过衍射测量法测量光栅的刻线密度。

根据正入射条件下闪耀波长的定义,在折射率已知的情况下,只要测出闪耀波长和刻线密度,由式(1)和式(3)就可以计算出光栅槽形角。

4.1 刻线密度的测量

用一块 300 g/mm 等间距反射平面光栅作为母光栅自制一块等间距 PDMS 透射光栅,将它安装于一维拉伸夹具上。对光栅中间区域进行测量。根据文献^[17],PDMS 光栅在自由状态下刻槽是等间距的;根据文献^[18]对 PDMS 基底拉伸的有限元分析,一维拉伸条件下 PDMS 光栅中间区域的刻槽也是等间距的。

利用反射光栅 Littrow 条件下的光栅方程,测量 PDMS 光栅的刻线密度。光源为 Thorlabs 公司的 632.8 nm 氦氖激光器,光学回转台的最小读数为 $10'$ 。测量入射与衍射光斑重合时光学回转台转动的角度。光斑直径为 2.5 mm,光路长度为 1.7 m,推算出瞄准精度为 0.042° 。实际测量计算出 PDMS 光栅处于自由状态时的光栅刻线密度为 298.4 g/mm,周期为 $3.351 \mu\text{m}$;拉伸量为 25.4%时,光栅刻线密度为 241.6 g/mm,周期为 $4.139 \mu\text{m}$ 。

4.2 PDMS 透射光栅闪耀波长的测量

用经过汞灯标定过的单色仪作为光源,Thorlabs 公司 PM100D 光功率计作为探测器,在正入射条件下测量自由和拉伸状态下不同波长的 -1 级衍射光强,计算出对应的衍射效率,实验中单色波长的步长小于 6 nm,结果如图 9 和图 10 所示。在自由状态下,光栅最大衍射效率对应的波长,即闪耀波长为 488.5 nm,最大衍射效率为 69.8%。当 PDMS 光栅在垂直刻槽方向上拉伸 25.4%时,闪耀波长为 508 nm,最大衍射效率为 61.6%。

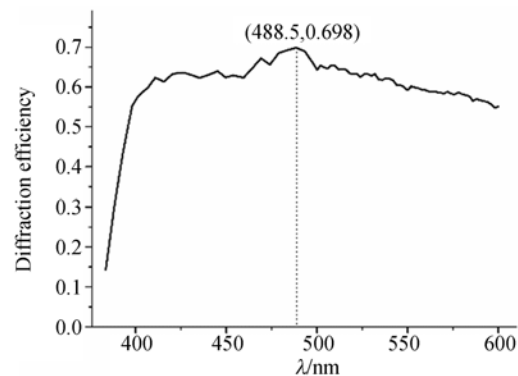


图 9 PDMS 光栅自由状态正入射的 -1 级衍射效率
Fig. 9 Variation of -1 order diffraction efficiency with wavelength of PDMS grating without stretching in normal incidence

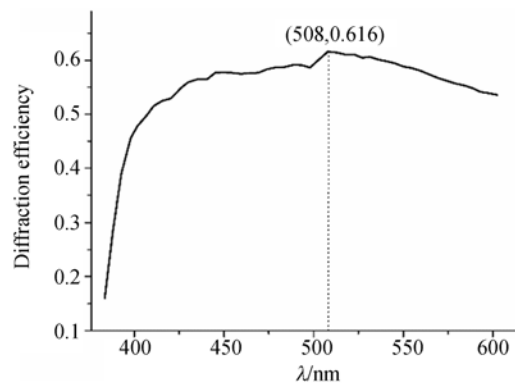


图 10 PDMS 光栅拉伸 25.4%时正入射的 -1 级衍射效率
Fig. 10 Variation of -1 order diffraction efficiency with wavelength of PDMS grating stretched by 25.4% in normal incidence

4.3 PDMS 介质的折射率测量

PDMS 光栅的制备采用 Dow Corning 公司生产的 Sylgard 184 PDMS 树脂材料,由预凝剂和固化剂按照 15:1 的配比,经过 100°C 固化制成。阿贝折射率仪测试得到 PDMS 材料的折射率为 1.415。

4.4 PDMS 光栅槽形计算

将 4.1、4.2 和 4.3 的实验数据代入式(1)和式(3)计算出 PDMS 透射光栅在自由状态下的等效槽形角为 18.90° ,拟合出理想的直角三角形光栅槽形,其斜边为 $3.351 \mu\text{m}$;拉伸率为 25.4%时,等效槽形角为 16.19° ,理想直角三角形光栅槽形的斜边为 $4.139 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

本文研究了闪耀透射光栅垂直和倾斜入射时衍射因子极大的条件,从而得到衍射光波能量分布的规律,发现衍射能量最强方向上衍射光的衍射角与入射光的入射角之间对于光栅刻槽衍射面满足 Snell 定律;在此条件下推导了入射角、衍射角与槽形角之间的关系式,该关系式表明当垂直入射时衍射波长为闪耀波长,对应的衍射角为闪

耀角。对已有的闪耀透射光栅进行测量,实验数据与理论计算数据基本相符。实际测量的闪耀波长误差小于 5 nm;在倾斜入射时,入射光能量最大的入射角方向的角度误差为 0.43° ,验证了理论的正确性。应用理论公式对可变周期的 PDMS 闪耀透射光栅在拉伸与自由状态下的闪耀波长和光栅刻线密度进行测量,计算出槽形角,拟合出光栅的等效槽形,从而监测 PDMS 光栅在拉伸过程中拉伸力与光栅刻线密度和光栅槽形变化之间的关系,具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] LOEWEN E G, POPOV E. *Diffraction Gratings and Applications*[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1997: 1-19.
- [2] 张洋, 杨增鹏, 孟祥月, 等. 太阳光栅光谱仪方案设计[J]. 光学仪器, 2017, 39(2): 81-88.
ZHANG Y, YANG Z P, MENG X Y, et al.. Design of solar echelle spectrograph[J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(2):81-88. (in Chinese)
- [3] 赵建君, 牛海莎, 陈红叶, 等. 利用平面透射光栅探测激光信息的理论研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 799-802.
ZHAO J J, NIU H SH, CHEN H Y, et al.. Theoretical study of detecting laser information by sinusoidal grating[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(7): 799-802. (in Chinese)
- [4] 赵屹东, 崔明启, 朱佩平, 等. 透射光栅在同步辐射光束线输出特性诊断中的应用[J]. 高能物理与核物理, 2000, 24(11): 1043-1049.
ZHAO Y D, CUI M Q, ZHU P P, et al.. Application of transmission grating in diagnoses of synchrotron radiation beamline output[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2000, 24(11): 1043-1049. (in Chinese)
- [5] 陈水良, 李以贵. 周期可变光栅的研制及应用[J]. 微细加工技术, 2005(1): 26-28.
CHEN SH L, LI Y G. Research and application of period-variable grating[J]. *Microfabrication Technology*, 2005(1): 26-28. (in Chinese)
- [6] 叶超, 谢永军, 付绍军, 等. 采用弹性基底制作变间距光栅[J]. 微细加工技术, 2006(2): 21-24.
YE CH, XIE Y J, FU SH J, et al.. Fabrication of varied-line-spacing grating by elastic medium[J]. *Microfabrication Technology*, 2006(2): 21-24. (in Chinese)
- [7] 黄肿, 欧阳艳东. 具有可变电控光栅常数的液晶光栅[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 296-301.
HUANG CH, OUYANG Y D. Liquid crystal grating with variable and electrically controlled constants[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):296-301. (in Chinese)
- [8] 姜兰钰, 汪静, 周笑辉, 等. 沟槽微结构薄膜制备及润湿特性研究[J]. 大学物理实验, 2010, 23(5): 4-6.
JIANG L Y, WANG J, ZHOU X H, et al.. The preparation of the groove micro structure film and the research of wetting[J]. *Physical Experiment of College*, 2010, 23(5):4-6. (in Chinese)
- [9] 姜兰钰, 汪静, 潘超, 等. 聚二甲基硅氧烷润湿各向异性薄膜[J]. 物理实验, 2011, 31(3): 4-7.
JIANG L Y, WANG J, PAN CH, et al.. Wetting anisotropy film of polydimethylsiloxane[J]. *Physics Experimentation*, 2011, 31(3):4-7. (in Chinese)
- [10] 汪静, 曲冰, 迟建卫, 等. 周期可调光栅的制备[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(3): 12-14.
WANG J, QU B, CHI J W, et al.. Preparation of period-tunable grating film[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2012, 31(3):12-14. (in Chinese)
- [11] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(7): 811-818.
- [12] 王博. 高密度相位光栅的偏振选择性[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 348-352.
WANG B. Polarization-selectivity of high-density phase gratings[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4):348-352. (in Chinese)

- [13] 刘全, 吴建宏. 光栅的标量衍射理论与耦合波理论的分析比较[J]. 激光杂志, 2004, 25(2): 31-34.
LIU Q, WU J H. Analysis and comparison of the scalar diffraction theory and coupled-wave theory about grating[J]. *Laser Journal*, 2004, 25(2): 31-34. (in Chinese)
- [14] 崔敏, 张斌珍, 张勇. 一种新型可调光栅的制作方法[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(3): 46-48.
CUI M, ZHANG B ZH, ZHANG Y. A new fabricating method of tunable grating[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(3): 46-48. (in Chinese)
- [15] 刘洪兴, 张巍, 巩岩. 光栅参数测量技术研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 103-110.
LIU H X, ZHANG W, GONG Y. Progress in grating parameter measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 103-110. (in Chinese)
- [16] 牛渊, 张敏, 王俊杰, 等. 基于白光干涉法测量微光栅形貌及相关几何参量的研究[J]. 光学仪器, 2017, 39(2): 1-7.
NIU Y, ZHANG M, WANG J J, *et al.*. Measurement of the profile of a micro-grating and related parameters based on white light interferometry [J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(2): 1-7. (in Chinese)
- [17] 姜兰钰, 汪静, 周笑辉, 等. 聚二甲基硅氧烷光栅薄膜制备及光栅常量测量[J]. 物理实验, 2010, 30(5): 5-7.
JIANG L Y, WANG J, ZHOU X H, *et al.*. Preparation of polydimethylsiloxane grating film and measurement of its grating constant[J]. *Physics Experimentation*, 2010, 30(5): 5-7. (in Chinese)
- [18] 李东泽, 郭笑楠, 颜卓程, 等. 基于 Abaqus 的 PDMS 基底有限元分析[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(11): 57-60.
LI D Z, GUO X N, YAN ZH CH, *et al.*. Finite element analysis of PDMS substrate based on Abaqus[J]. *Electronic Components and Materials*, 2015, 34(11): 57-60. (in Chinese)

作者简介:



黄元申(1963—),男,上海人,硕士,高级工程师,上海理工大学光电信息与计算机工程学院光电仪器研发中心主任,主要从事衍射光栅和微纳光学元件的设计与加工。E-mail: hyshyq@sina.com

通讯作者:



过军军(1989—),男,湖南株州人,硕士研究生,主要研究方向为衍射光栅。E-mail: 157670504@usst.edu.cn