

用于脉冲压缩光栅的宽带高分辨率光谱测量技术

何 凯^{1,2} 刘世杰¹ 侯永强^{1,2} 李 煦^{1,2} 晋云霞¹ 易 葵¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 以多层介质膜或金属膜为基底的脉冲压缩光栅在利特罗角附近使用, 具有衍射效率高、衍射光谱带宽等特点, 需要对其衍射光谱进行高分辨率的准确测量, 以便为其制作工艺的改进提供可靠依据。根据双光路测量原理, 建立了衍射光栅高分辨率光谱测量技术和实验装置。重点阐述了双束光路设计消除光源波动和杂散光对衍射效率测试结果影响的原理, 通过光路改进解决了衍射光斑过大, 且不能被光探测器完全收集的技术难点以及衍射光与入射光共路导致的探测器挡光问题。该装置可以测量宽带脉冲压缩光栅各级次的反射衍射光谱和透射衍射光谱, 也可以测量在固定波长处的衍射角谱分布。目前的衍射光谱测试分辨率为 1 nm, 角谱分辨率为 0.2°。采用该装置测量了脉冲压缩光栅样品的光谱与角谱, 在衍射效率超过 90% 的 770~870 nm 的衍射带内, 多次测量的平均相对偏差小于 1.0%, 可能的测量误差小于 2.2%。

关键词 光栅; 光谱学; 衍射效率; 宽带; 高分辨率

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1005002

Broadband and High Resolution Spectral Measurement Technique for Pulse Compression Gratings

He Kai^{1,2} Liu Shijie¹ Hou Yongqiang^{1,2} Li Xu^{1,2} Jin Yunxia¹ Yi Kui¹

(¹ Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Pulse compression gratings based on multilayer dielectric film or metal multilayer dielectric film usually work around the Littrow angle with high diffraction efficiency and broad diffraction band. There is a large requirement to have high resolution and accurate measurement on the grating diffraction spectrum in the purpose of optimizing the fabrication process. Based on the double light paths system, an optical characterization method and the corresponding setup with high spectral resolution for broadband high diffraction efficiency pulse compression gratings are demonstrated. The method to eliminate the influence of the background and the light source fluctuation is discussed in detail. Two practical problems are perfectly settled, including the large spot size of diffracted light which is not completely collected by optical detector and the detector blocking of the incident light near the Littrow angle. The setup can measure the reflection and transmission diffractive spectra for each diffractive order of broadband pulse compression gratings, as well as the angular spectrum with fixed wavelength. The setup can measure the grating diffractive spectrum with resolution of 1 nm and the grating angular spectrum with resolution of 0.2° at present. The optical spectrum and angular spectrum of pulse compression grating samples are measured on the established measurement setup. Diffraction efficiencies greater than 90% in the wavelength range of 770~870 nm are obtained with measurement error no more than 2.2% and average relative deviation no more than 1.0%.

Key words gratings; spectroscopy; diffraction efficiency; broadband; high resolution

OCIS codes 050.1950; 120.4820; 300.6320

收稿日期: 2013-04-10; 收到修改稿日期: 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(11104295)

作者简介: 何 凯(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事紫外光刻仿真和光栅衍射测量等方面的研究。

E-mail: thhk06@gmail.com

导师简介: 刘世杰(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事衍射光学和光学检测等方面的研究。E-mail: shijieliu@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引言

脉冲压缩光栅^[1-2]是用于高功率激光啁啾脉冲放大系统中的关键元件。为了输出高功率激光,脉冲压缩光栅需要具有高衍射效率^[3-6]、大衍射带宽^[7-10]以及高损伤阈值^[11-13]的特性。金属光栅虽然具有宽衍射带,但和介质膜光栅相比,损伤阈值较低。目前应用于高功率激光的宽带脉冲压缩光栅主要包括金属多层介质膜光栅与全介质膜光栅。

目前,对脉冲压缩光栅的研究主要侧重于理论设计与实验制备^[14-18],对脉冲压缩光栅光谱的实验测量报道较少^[6,17-19],高分辨率的衍射光谱测量还未见报道;普通衍射光学元件的实验测量也多用激光作为光源,仅在几个离散的激光波长处测量相应的衍射效率。脉冲压缩光栅在衍射带宽内易出现泄漏模共振现象^[20],该现象会导致光谱曲线突变与近场增强效应,从而降低光栅的抗激光损伤能力。因此,在光栅设计时应尽量避免出现泄漏模共振现象,并需通过衍射光谱检测技术进行验证。然而,泄漏模共振现象只在特定波长极窄的带宽内出现,仅在几个离散波长处测量光栅的衍射效率是无法准确对整个衍射带宽内泄漏模共振现象进行准确表征的。因此,脉冲压缩光栅需要宽带的较高分辨率的衍射光谱测量技术。

本文发展了一种基于双束光路测量^[21-22]脉冲压缩光栅宽带高分辨率的光谱测量技术。双光路测量可以消除光源波动和杂散光的影响,单色仪提供高分辨率的单色光源,实现了高分辨率的光谱测量。单色仪光源波长可调节范围大、分辨率高,完全能满足宽带衍射光谱测量的要求。采用探测器前置聚光镜并优化测试光路,解决了单色仪光源平行度差导致衍射光斑过大、只能部分被探测器收集的问题。通过微调入射光相对光栅栅线的方位角,避免了脉冲压缩光栅在利特罗角附近入射光和衍射光共路导致的探测器挡光问题。最后实验测量了样品光栅的衍射效率,并与傅里叶模式理论(FMM)的模拟结果进行了比较分析。

2 衍射效率的定义

光栅衍射效率通常有两种定义,即相对衍射效率与绝对衍射效率。前者定义为特定衍射级次的光能量和相同光束经与光栅有相同孔径的标准平面反射镜反射后的光能量之比;后者定义为特定衍射级次的光能量与入射光能量之比。这里采用绝对衍射

效率,即

$$\eta(\lambda) = \frac{E_m(\lambda)}{E_i(\lambda)}, \quad (1)$$

式中 E_m 表示第 m 级衍射光能量, E_i 表示入射光能量, η 为光栅绝对衍射效率。由(1)式可以看出,为了提高衍射效率的测试精度,需尽可能准确地测量衍射光能量 E_m 和入射光能量 E_i 。此外,只有光源的输出波长具有非常高的分辨率才能测量出高分辨率的光谱,这对光源的性能提出了较高要求。

3 测量仪器与原理

光栅衍射测量装置结构如图 1 所示,其中 a 为单色光源输入光路; b 为参考光路; c 为入射光路; d 为衍射光路。B 为溴钨灯照明光源; M 为单色仪; A 为光阑; P 为起偏器; C 为准直镜; S 为分束器; D1、D2 为探测器; F1、F2 为聚光透镜; R1、R2 为旋转臂与旋转平台; G 为光栅样品。单色仪 M 提供的单色光(600~1200 nm)经起偏、准直以后得到输入光 a; 输入光经分束器分束后,分为参考光 b 与测量光 c; 测量光经样品光栅衍射后得到衍射光 d。探测器在 600~950 nm 波段选用商用化 Si 探测器,在 950~1200 nm 波段选用商用化 InGaAs 探测器,探测器光敏面直径分别是 5 mm 与 3 mm。

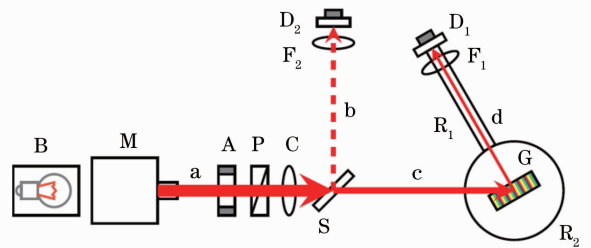


图 1 光栅衍射测量装置结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of grating diffraction measurement setup

旋转平台 R_2 控制入射光相对光栅法线的入射角 θ_i , 旋转臂 R_1 控制需测量的衍射光衍射角 θ_m 。衍射角与入射角的关系可表示为

$$\sin(\theta_m) = \sin(\theta_i) + \frac{m\lambda}{d}. \quad (2)$$

测量前,为了消除探测器的暗电流与背景杂散光的影响需要校零。来自暗电流与背景杂散光的噪声信号为 e , 探测器直接测量的信号为 E , 则实际的光线能量信号为 $E - e$ 。光栅放置到样品台前时,如图 2(a) 所示,探测器 D_2 测量到的参考光路信号为 $E'_2 - e'_2$, 探测器 D_1 测量到的入射光路信号为 $E'_1 - e'_1$ 。

所以分束镜分束比 η_s 为

$$\eta_s = \frac{E'_1 - e'_1}{E'_2 - e'_2}. \quad (3)$$

放置光栅样品后,如图 2(b)所示,探测器 D_2 测量的参考光路信号为 $E_2 - e_2$,探测器 D_1 测量的入射光路信号为 $E_1 - e_1$,假设光栅的衍射效率是 η ,则入射光路入射到光栅前时为 $\frac{E_1 - e_1}{\eta}$ 。由于分束镜在同

一波长的消光比不变,所以有

$$\eta_s = \frac{E_1 - e_1}{\eta(E_2 - e_2)}. \quad (4)$$

由(3)式、(4)式可以得到在该波长处的光栅衍射效率为

$$\eta = \frac{(E_1 - e_1)(E'_2 - e'_2)}{(E_2 - e_2)(E'_1 - e'_1)}. \quad (5)$$

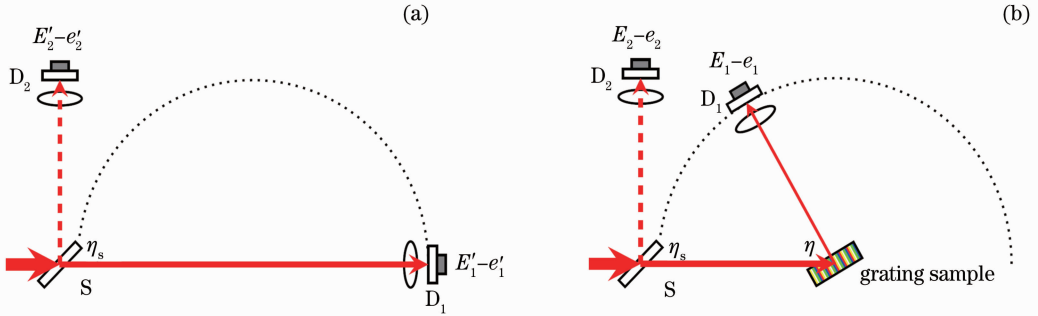


图 2 双光路测量原理。(a)放置光栅前;(b)放置光栅后

Fig. 2 Principle of double light paths measurement. (a) Before placing grating; (b) after placing grating

由前述可知,参考光路信号与入射光路信号是同时测量的,只要分束镜的消光比保持不变,就消除了光栅样品放置前与放置后的光源波动性带来的影响。探测器的暗电流与背景杂散光的噪声也已消除。为了提高信噪比,实验时,溴钨灯、单色仪要与装置中的其他部分隔离,分别放到两个暗室中。

4 光斑问题与挡光问题

衍射光谱测量装置第一个易出现的问题是衍射光斑过大,而商用探测器接收面有限,只能采集部分光线,导致最终测试结果不准确,此即光斑问题。宽带高分辨率的光谱测量,要求光源系统能够在宽波长范围内输出约 0.1 nm 分辨率的单色光,普通激光光源一般无法满足这种要求,因此在测量装置中采用了白光光源结合单色仪作为光源。与激光光源相比,单色仪输出光有波长范围宽(600~1200 nm)、光谱分辨率高(0.1 nm)、价格便宜等优点,但也带来了光源发散角较大、能量低的问题,因此需要优化设计光路才能满足测试需求。

在测量光路中,首先采用光阑限制发散角过大的光线通过,再经准直透镜(焦距 150 mm)准直,得到发散角较小的准平行单色光束。该光束经分束后传播到探测器时,由于传播距离较长(700 mm),光斑尺寸可达 5 mm×5 mm;如果中间经光栅衍射,衍射效应会使光斑尺寸增大到 15 mm×5 mm。测量装置的探测器光敏面直径均小于 5 mm,对于上述

光斑,商用探测器无法全部接收。为此,在探测器前加装焦距 50 mm、直径 25 mm 的聚光透镜,以达到缩小光斑尺寸的目的。经光束质量分析仪测得聚焦后的衍射光斑的直径缩小到 0.81 mm,从而使光斑问题得到有效解决。

在脉冲压缩光栅测量过程中,另一个易出现的问题是挡光问题。当入射光的入射角接近利特罗角时,衍射光将与入射光重合或夹角很小,两者无法分离,探测器测量衍射光时会挡住入射光而无法测量,导致测量盲区的产生,见图 3 所示。最初入射光为 i ,衍射光为 m ,两者夹角太小,无法分离,探测器 D_1 测量时将挡住入射光。为此,微调入射光相对光栅线的方向角,由垂直位置 i 微调 2.5° 到方向角为 87.5°

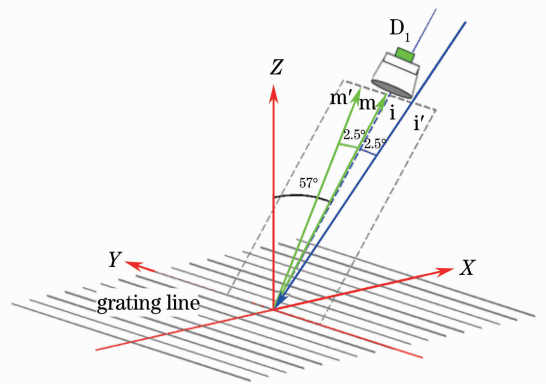


图 3 挡光问题示意图

Fig. 3 Diagram of light blocking

的位置 i' , 此时衍射光的位置也将移动约 2.5° 到方向角 92.5° 的位置 m' , 现在入射光与衍射光夹角约 5° , 足够容纳探测器测量衍射光且不会挡住入射光。

方向角的微调对光谱测量的结果影响非常微小, 可以通过对比衍射光谱微调前后的变化进行比较。如图 4 所示, 微调前, 光谱存在挡光区域而产生测试盲区; 微调后, 可以测量目标波长范围内完整的光谱, 而且挡光区域之外, 微调前后光谱曲线几乎重合, 仅向短波长漂移了 1 nm 。因此, 方向角的微调对光谱测量的影响可以忽略不计。

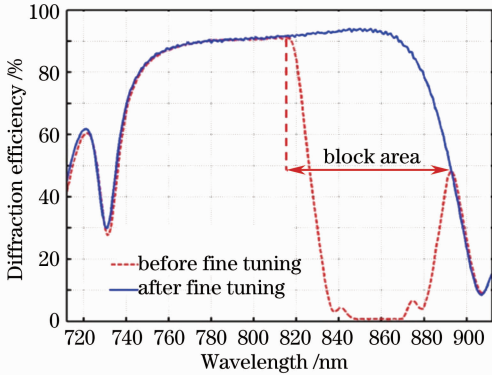


图 4 方向角微调对光栅光谱测量结果的影响

Fig. 4 Influence of fine tuning of direction angle on measurement result of grating spectrum

5 光栅测试结果与分析

为了评价光栅样品制备的质量, 为光栅制备工艺优化提供反馈信息, 也为了验证光栅光谱测量装置的性能, 采用光栅衍射测量装置对光栅样品进行了高分辨率的表征。

5.1 实验光栅样品与测试方法

实验采用的光栅样品详细特性可见参考文献 [11], 其结构如图 5 所示, 各参数分别为: 光栅厚度 $t_g = 121\text{ nm}$, 顶层剩余厚度 $t_r = 2\text{ nm}$, 匹配层厚度 $t_m = 74\text{ nm}$, 占空比 $f = 0.25$; 控制高反膜各层膜厚的参考光波长为 $\lambda_r = 863\text{ nm}$; 其高低折射率材料 (折射率) 分别为 HfO_2 (2.12)、 SiO_2 (1.48), 匹配层的材料是 SiO_2 ; 光栅周期 510 nm , 使用波长 800 nm , 使用角度 57° 。

该脉冲压缩光栅样品为反射型光栅, 使用 -1 级工作, 衍射级次只有 0 级与 -1 级。普通的分光光度计可以直接测量光栅的 0 级衍射效率, 但无法测量光栅其他级次的衍射效率。为此, 用光栅衍射测量装置与 Lambda1050 分光光度计分别测量了该光栅的 0 级衍射效率, 结果表明, 两种装置对 0 级衍

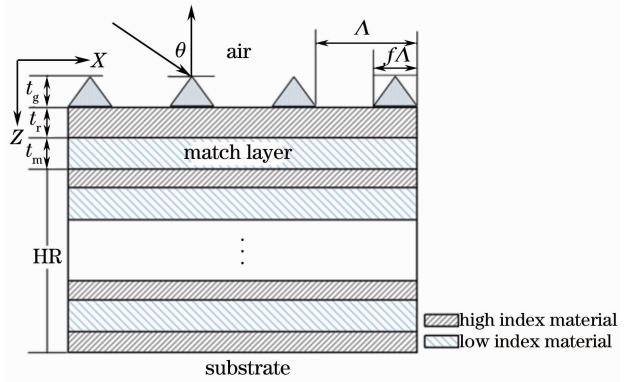


图 5 光栅样品结构

Fig. 5 Grating sample structure

射效率的测量差别小于 0.5% 。因此, 可用 100% 的衍射效率减去 0 级的衍射效率得到 -1 级衍射效率的可能最大值, 用来估计光栅衍射测量装置直接测量 -1 级衍射效率的结果可靠性。测量过程中, 采用光栅光谱测量装置测量光栅 -1 级与 0 级衍射, 测试条件为 s 偏振态, 测试波长范围 $712 \sim 912\text{ nm}$, 扫描步长 1 nm ; 模拟方法为标量衍射的傅里叶模式理论, 模拟参数与测试条件相同。

5.2 光栅衍射光谱

光栅样品的衍射效率实验测试曲线与模拟结果曲线如图 6 所示。图 6 实验测量的 -1 级衍射效率在使用波长 800 nm 处为 91.2% , 衍射效率超过 90.0% 的带宽为 100 nm ($770 \sim 870\text{ nm}$); 根据实验测量的 0 级衍射效率估算的 -1 级衍射效率上限在 800 nm 处为 93.2% , 衍射效率超过 90.0% 的带宽为 130 nm ($750 \sim 880\text{ nm}$); 模拟结果表明, 该光栅设计的 -1 级理论衍射效率在使用波长 800 nm 处为 98.0% , 衍射

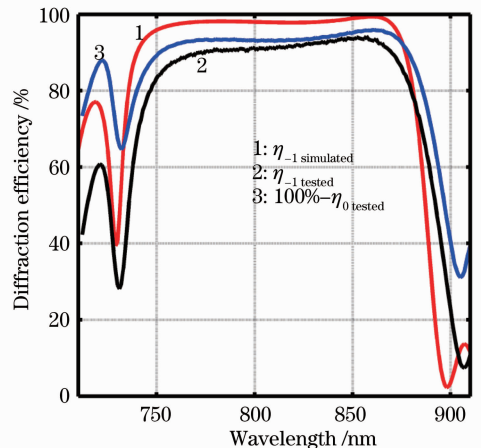


图 6 光栅样品的衍射光谱曲线

Fig. 6 Diffraction spectra curves of the grating sample

效率超过 90.0% 的带宽为 140 nm (740~880 nm)。使用波长 800 nm 处,直接测量结果比间接估算结果低 2.0%,比理论结果低 6.8%;因此无论从直接测量还是间接估算来看,光栅的衍射效率与带宽均没有达到设计时的模拟计算结果值,这表明光栅制备的工艺与质量有待提高。

从图 6 还可以看出直接测量结果在整个波段范围内均比间接估算结果低。可能原因是直接测量时测量结果存在一定的系统误差,该系统误差使得结果偏低;还有可能是光栅本身存在一定的吸收、散射等因素,使得直接测量结果偏低。另外,衍射曲线在带宽以外的峰谷对应的波长与形状均基本吻合,说明光栅测量结果还是很可靠的。

为进一步了解光栅在衍射效率超过 90% 的整个带宽范围内测量结果与计算结果的差异,可以使用带宽积分平均衍射效率^[23]的概念。光栅第 m 级衍射的带宽积分平均衍射效率为

$$\bar{\eta}_m = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda, \quad (6)$$

式中 λ_{\max} 和 λ_{\min} 表示带宽的波长上限与下限。

设比较的带宽范围为 770~870 nm,利用(6)式计算的实验直接测量-1 级带宽积分平均衍射效率为 91.8%,由实验间接测量的-1 级带宽积分平均衍射效率为 94.0%,而模拟计算结果的-1 级带宽积分平均衍射效率为 98.3%。对于带宽积分平均衍射效率,直接测量结果与实验间接测量结果偏差为 2.2%,直接测量结果与模拟计算结果偏差为 6.5%,这两者与前述 800 nm 的工作波长处对应的两个偏差都非常接近。鉴于 0 级衍射测量结果准确性经过分光光度计验证,可以认为光栅衍射效率测试装置的误差在 2.2% 以内。

对光栅样品的-1 级衍射效率曲线测试三次,以考察系统的稳定性。测试结果表明,光栅衍射测量装置在 712~912 nm 范围内任意波长处其平均相对偏差均小于 1.0%,因此系统具有良好的稳定性。

5.3 光栅衍射角谱

光栅角谱的测试方法是,固定入射光波长为 800 nm,s 偏振态,使其入射角度在 45°~70° 范围内变化(扫描步长 0.2°),测试对应入射角的衍射效率,如图 7 所示。角谱曲线与光谱曲线特征几乎相同,也是光栅-1 级衍射效率直接测量比间接估算结果偏低,而间接估算结果又比理论计算结果偏低。

此外角谱曲线,直接测量与间接测量衍射效率最大值处对应的入射角均为 51.8°;利特罗角可表示为

$$\sin(\theta_{\text{Littrow}}) = \frac{m\lambda}{2d}. \quad (7)$$

而根据(7)式,计算该光栅 800 nm 对应的利特罗角为 51.65°。光栅衍射理论表明,光栅通常在利特罗角处有最大的衍射效率,因此,角谱测试结果与理论基本相符。

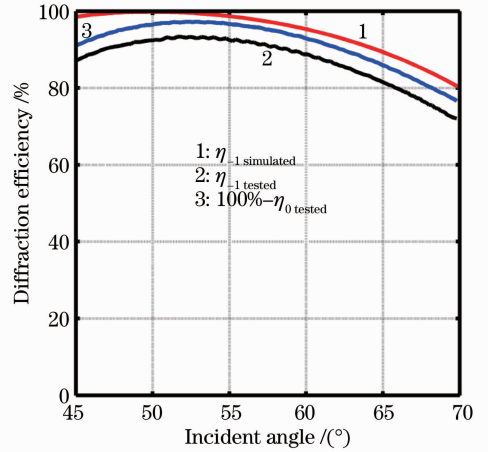


图 7 光栅样品的衍射角谱曲线

Fig. 7 Angular spectra curves of the grating sample

6 结 论

针对脉冲压缩光栅的衍射测试特殊需求,并根据光栅衍射效率的定义与测试原理,设计了一种基于双光路测量的脉冲压缩光栅宽带高分辨率的光谱测量装置,功能包括反射式与透射式光栅的光谱测试、角谱测试。解决了脉冲压缩光栅测量易出现的挡光问题与光斑过大问题,并消除了杂散光的影响。对实验制备的光栅样品在 712~912 nm 范围内,进行了高分辨率衍射光谱与角谱测试,并与模拟计算结果比较。测试结果表明,在光栅 90% 衍射效率带宽范围内,直接测量与间接估算的偏差小于 2.2%,与模拟估算的偏差小于 6.8%,多次测量的相对平均偏差小于 1.0%。

参 考 文 献

- 1 D Strickland, G Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. Opt Commun, 1985, 56(3): 219-221.
- 2 M Pessot, J Squier, G Mourou, et al.. Chirped-pulse amplification of 100-fsec pulses [J]. Opt Lett, 1989, 14(15): 797-799.
- 3 M D Perry, R D Boyd, J A Britten, et al.. High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings [J]. Opt Lett, 1995, 20(8): 940-942.

- 4 L F Li, J Hirsh. All-dielectric high-efficiency reflection gratings made with multilayer thin-film coatings [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(11): 1349–1351.
- 5 K Hehl, J Bischoff, U Mohaupt, *et al.*. High-efficiency dielectric reflection gratings: design, fabrication, and analysis [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(30): 6257–6271.
- 6 P P Lu, K X Sun, R L Byer, *et al.*. Precise diffraction efficiency measurements of large-area greater-than-99%-efficient dielectric gratings at the Littrow angle [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(11): 1708–1710.
- 7 I Jovanovic, C G Brown, B C Stuart, *et al.*. Precision damage tests of multilayer dielectric gratings for high-energy petawatt lasers [C]. *SPIE*, 2005, 5647: 34–42.
- 8 S J Liu, Z C Shen, W J Kong, *et al.*. Optimization of near-field optical field of multi-layer dielectric gratings for pulse compressor [J]. *Opt Commun*, 2006, 267(1): 50–57.
- 9 N Bonod, J Neauport. Optical performance and laser induced damage threshold improvement of diffraction gratings used as compressors in ultra high intensity lasers [J]. *Opt Commun*, 2006, 260(2): 649–655.
- 10 J Neauport, E Lavastre, G Raze, *et al.*. Effect of electric field on laser induced damage threshold of multilayer dielectric gratings [J]. *Opt Express*, 2007, 15(19): 12508–12522.
- 11 J Wang, Y Jin, J Ma, *et al.*. Design and analysis of broadband high-efficiency pulse compression gratings [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(16): 2969–2978.
- 12 J P Wang, Y X Jin, J D Shao, *et al.*. Optimization design of an ultrabroadband, high-efficiency, all-dielectric grating [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(2): 187–189.
- 13 Kong Weijin, Wang Shuhao, Wei Shijie, *et al.*. Diffraction property of broadband metal multi-layer dielectric gratings based on rigorous coupled-wave analysis [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 114214.
孔伟金, 王书浩, 魏世杰, 等. 基于严格耦合波理论的宽光谱金属介质膜光栅衍射特性分析[J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 114214.
- 14 J Neauport, N Bonod, S Hocquet, *et al.*. Mixed metal dielectric gratings for pulse compression [J]. *Opt Express*, 2010, 18(23): 23776–23783.
- 15 Q Y Bi, J J Zheng, A L Guo, *et al.*. Design and properties analysis of total internal reflection gratings for pulse compressor at 1053 nm [J]. *Current Applied Physics*, 2011, 11(1): 21–27.
- 16 B W Shore, M D Perry, J A Britten, *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings [J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(5): 1124–1136.
- 17 F Canova, R Clady, J-P Chambaret, *et al.*. High-efficiency, broad band, high-damage threshold high-index gratings for femtosecond pulse compression [J]. *Opt Express*, 2007, 15(23): 15324–15334.
- 18 D H Martz, H T Nguyen, D Patel, *et al.*. Large area high efficiency broad bandwidth 800 nm dielectric gratings for high energy laser pulse compression [J]. *Opt Express*, 2009, 17(26): 23809–23816.
- 19 A Bunkowski, O Burmeister, T Clausnitzer, *et al.*. Optical characterization of ultrahigh diffraction efficiency gratings [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(23): 5795–5799.
- 20 J P Wang, Y X Jin, J Y Ma, *et al.*. Study on guided-mode resonance characteristic of multilayer dielectric grating with broadband and wide using-angle [J]. *Chin Phys B*, 2010, 19(5): 054202.
- 21 Yang Liangliang, Cui Qingfeng, Liu Tao, *et al.*. Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412007.
杨亮亮, 崔庆丰, 刘涛, 等. 衍射光学元件衍射效率的测量[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412007.
- 22 Wei Xiaoru, Ju Jianzhi, Zhu Yayi. Precision diffraction efficiency measurements of gratings by double light path method [J]. *J Soochow University*, 2007, 23(4): 43–46.
韦晓茹, 居戡之, 朱亚一. 用双光路方法精确测量光栅衍射效率[J]. *苏州大学学报(自然科学版)*, 2007, 23(4): 43–46.
- 23 Xue Changxi, Cui Qingfeng, Pan Chunyan, *et al.*. Design of multi-layer diffractive optical element with bandwidth integral average diffraction efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3016–3020.
薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳, 等. 基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3016–3020.

栏目编辑: 韩 峰