

文章编号 1004-924X(2016)12-2983-05

复合型透射式脉冲压缩光栅的设计与制作

李朝明^{1*}, 陈新荣¹, 李林¹, 虞健¹, 吴建宏¹, 常增虎²

(1. 苏州大学物理与光电·能源学部与苏州纳米科技协同创新中心 苏州大学
江苏省先进光学制造技术重点实验室和教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

2. 中佛罗里达大学 光学-激光研究与教育中心, 佛罗里达 32816)

摘要:提出了一种用于飞秒钛宝石激光器的复合型透射式脉冲压缩光栅。该光栅由1 250 line/mm和3 300 line/mm两种光栅集成在一个熔石英基底上制成,其工作中心波长为800 nm,工作波段为700~900 nm。1 250 line/mm光栅用于脉冲压缩;3 300 line/mm光栅的运用则有益于减少透射光栅的反射损失,同时由于采用高频光栅结构代替了传统增透膜,可有效减少光栅基底的波前形变。该复合光栅完全由熔石英材料构成,故具有很高的损伤阈值。利用严格耦合波理论对该复合型透射光栅的微结构进行了优化设计,结果表明:1 250 line/mm光栅在中心波长800 nm处的一级衍射效率可达98%;3 300 line/mm增透光栅的透过率在700~900 nm波段可以达到99.7%以上。最后,应用全息记录技术和离子刻蚀技术实际制备了 $\Phi 65\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的复合式透射脉冲压缩光栅,实测衍射效率与理论设计相符。

关键词:脉冲压缩光栅;熔石英透射光栅;衍射效率;激光损伤阈值

中图分类号:O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162412.2983

Design and fabrication of a composite transmission pulse compression grating

LI Chao-ming^{1*}, CHEN Xin-rong¹, LI Lin¹, YU Jian¹, WU Jian-hong¹, CHANG Zeng-hu²

(1. College of Physics, Optoelectronics and Energy & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Key Laborator of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Key Laborator of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Center for Research and Education in Optics and Laser and Department of Physics, University of Central Florida, Orlando, FL 32816, USA)

* Corresponding author, E-mail: chaoming@suda.edu.cn

Abstract: A composite transmission pulse compression grating was proposed for femto-second Ti : sapphire lasers. The composite transmission grating with 700—900 nm bandwidth worked at a center wavelength of 800 nm was consisted of two gratings with groove densities 1 250 line/mm and 3 300 line/mm and they were integrated in a fused silica plate. The 1 250 line/mm grating was used for compressing laser pulse. The 3 300 line/mm anti-reflection grating was conducive to decreasing the reflection loss and avoiding the wave-front distortion by using

收稿日期:2016-10-27;修订日期:2016-11-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60808013, No. 61178046);江苏省高校自然科学研究重大项目(No. 11KJA140001);江苏省高校优势学科建设工程资助项目

a high frequency grating structure to replace the anti-reflection film on the surface of the fused silica plate. Completely being made of fused silica, the composite pulse compression grating has a high laser damage threshold. The composite transmission grating was designed based on the rigorous coupled wave theory. The optimization calculation results show that the -1 st order diffraction efficiency of the 1 250 line/mm grating is up to 98% (@ 800 nm) and the transmission of the 3 300 lp/mm grating is up to 99.7% at 700–900 nm bandwidth. Finally, the composite transmission pulse compression grating ($\Phi 65 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$) was fabricated by holographic recording and ion beam etching and its diffraction efficiency is coincident with that of the theoretical analysis.

Key words: pulse compression grating; fused silica transmission grating; diffraction efficiency; laser damage threshold

1 引言

随着纳秒、皮秒超短脉冲激光在焊接和切割等加工领域的广泛应用, 高端精密加工对大功率飞秒激光器的需求逐渐显现。飞秒激光的超快速时间和超高峰值特性将其能量全部、快速、准确地集中在限定的作用区域, 从而实现对几乎所有材料的非热溶性冷处理, 具有传统激光加工无法比拟的高精度和低损伤等优势。20 世纪 80 年代中期之后, 由于采用啁啾脉冲放大技术 (Chirped Pulse Amplification, CPA) 和宽带高增益介质, 激光峰值功率提高了 6~7 个数量级。脉冲压缩光栅是 CPA 技术的核心器件^[1-4]。

脉冲压缩光栅有透射式和反射式两种。反射式光栅主要有镀金光栅和多层介质膜光栅。镀金光栅已经被广泛应用于激光脉冲压缩, 其带宽大, 衍射效率最高可达 95%, 大尺寸镀金光栅适用于 TW 级的脉冲压缩。然而, 镀金光栅的热效应会导致脉冲压缩器的衍射效率减小。同时, 金属光栅存在的热吸收现象不可避免地降低了脉冲压缩器在使用过程中的损伤阈值。多层介质膜光栅的出现有效解决了热吸收问题, 相对于镀金光栅其激光损伤阈值更高。此外, 通过合理地设计膜系结构, 介质膜光栅的衍射效率可以达到 99%。但是多层介质光栅的带宽一般都比较窄, 只有数十纳米, 这在很大程度上限制了它在 100 fs 以下的 CPA 系统中的使用。熔石英具有很好的抗激光损伤特性, 常作为激光光学元件的材料。目前, 熔石英基底的透射式脉冲压缩光栅研究工作得到了人们的重视^[5]。本文围绕中心波长为 800 nm 的

透射式脉冲压缩光栅开展了相关的设计和制作工作。

2 复合型透射式脉冲压缩光栅的设计

2.1 脉冲压缩光栅的结构设计

飞秒激光脉冲的波长带宽很宽, 光线在入射时不可能使每个波长的分量都满足 Littrow 角入射, 因此这里在透射光栅设计时选择中心波长为 Littrow 角入射。中心波长不仅是脉冲能量相对比较集中的区域, 还是系统色散补偿的关键点。光栅设计的目标是在尽可能宽的波长范围内实现尽可能高的衍射效率。在一定的波长、偏振态和入射角的条件下, 光栅的衍射效率取决于光栅的槽形参数 (光栅周期 d 、槽深 h 、占宽比和槽型)。光栅的入射角为 Littrow 角时, 合理地优化槽形参数可以使光栅的 -1 级衍射效率达到极大值, 中心波长的衍射效率接近 100%。

这里脉冲压缩光栅的槽型选用矩形结构, 如图 1 所示。TE 波以 30° 角入射到 1 250 line/mm 的透射光栅, 采用严格耦合波理论对光栅的衍射

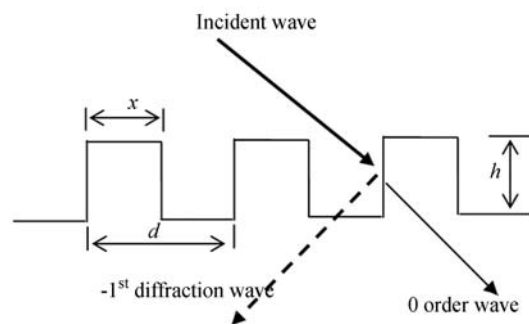


图 1 矩形槽透射光栅的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission grating with rectangular grooves

效率进行相关计算。

图 2(a), 2(b) 和 2(c) 给出了矩形槽光栅在不同波长下的一级光栅衍射效率与占空比($\Delta = x/d$)和深度 h 的关系。图 3 的计算结果表明,当

石英光栅槽深为 $1.38 \mu\text{m}$, 占空比 $\Delta = 0.5$ 时, $\lambda = 800 \text{ nm}$ 处透射一级衍射效率可以达到 98% ; $\lambda = 700 \text{ nm}$ 处透射一级衍射效率为 80.5% ; $\lambda = 900 \text{ nm}$ 处透射一级透射衍射效率为 91% 。

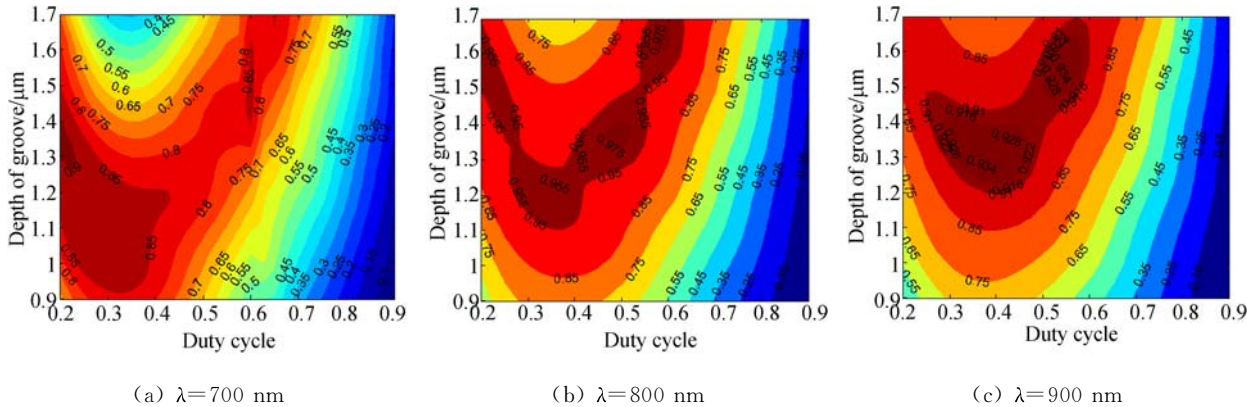


图 2 1 250 line/mm 矩形光栅在不同波长下的一级衍射效率分布

Fig. 2 Contour maps of -1st order diffraction efficiency distribution of 1 250 line/mm rectangular gratings at different wavelengths

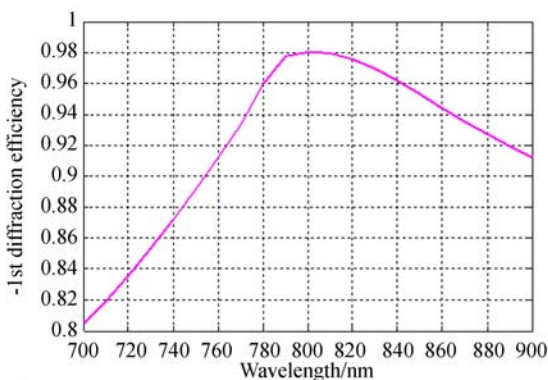


图 3 700~900 nm 波长下矩形光栅的一级衍射效率曲线

Fig. 3 Minus first order diffraction efficiency curve of rectangular grating in 700-900 nm

2.2 高空频增透光栅设计

透射光栅后表面的基底反射一定程度上削弱了光栅的衍射效率, 一般选择镀增透膜来降低下表面的反射损失。但是增透膜层的应力分布很容易受到实验工艺条件的影响, 而透射光栅的基底通常比较薄(1~2 mm), 应力的不均匀分布一定程度上降低了玻璃基底的表面平整度, 进而产生波像差。文献[6]指出在未优化增透膜实验工艺时, 因基底形变而产生的反射波像差大约为 60λ ; 而在改进实验工艺后, 波像差得到了有效的降低(约为 3λ)。为避免脉冲压缩光栅产生形变, 并且

兼顾光栅后表面的增透效果, 本文提出在光栅基底后表面制备高空频线光栅的方法实现增透。

根据光栅衍射方程可知: $\sin \theta - \sin \gamma = m\lambda/d$, 当光栅周期 d 远小于波长 λ 时, 光栅只存在 0 级衍射光, 因此通过合理地优化槽型参数可以提高 0 级透过率。

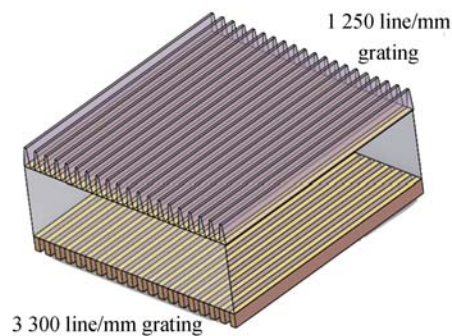


图 4 复合型透射脉冲压缩光栅结构

Fig. 4 Structure of composite pulse compression transmission gratings

如图 4 所示, 光栅线密度为 $3\ 300 \text{ line/mm}$, 光栅槽形为矩形, TE 偏振, 30° 角入射, 利用严格耦合波程序计算出零级透过率分布如图 5 所示。由图 5 可知, 700 nm 时衍射效率最大值在占空比

为 0.3~0.4,槽深为 0.15~0.18 μm 的区域,零级透过率>99.8%;800 nm 时衍射效率最大值在占宽比为 0.3~0.4,槽深为 0.15~0.21 μm 的区

域,零级透过率>99.8%;900 nm 时,衍射效率最大值在占宽比为 0.3~0.4,槽深为 0.19~0.24 μm 的区域,零级透过率>99.8%。

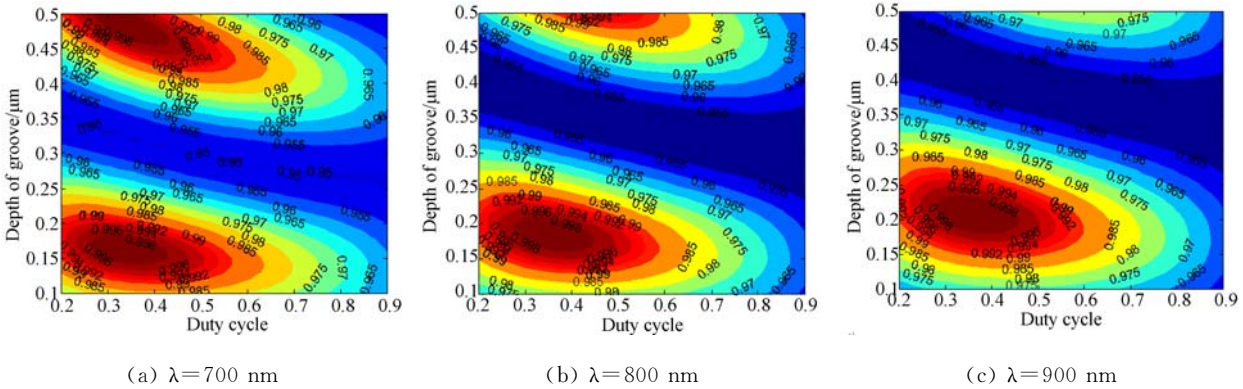


图 5 3 300 line/mm 矩形光栅在不同波长处的 0 级透过率

Fig. 5 Contour map of 0 order transmittances of 3 300 line/mm rectangular grating at different wavelengths

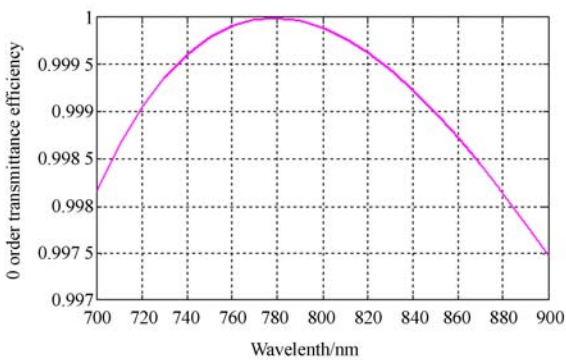


图 6 3 300 line/mm 矩形光栅的 0 级透过率曲线

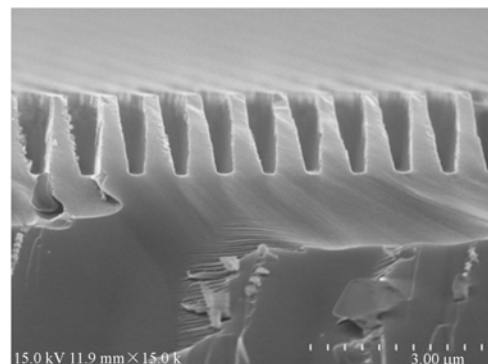
Fig. 6 Zero order transmittance curve of 3 300 line/mm rectangular grating in 700—900 nm

由图 5 可知,700,800 和 900 nm 波长处矩形光栅的零级透过率极大值的分布区间很接近。图 6 的计算结果显示,光栅的占空比 $\Delta=0.35$,槽深为 0.18 μm ,可以看出,在 700~900 nm 的带宽内,光栅的零级透过率均大于 99.7%。

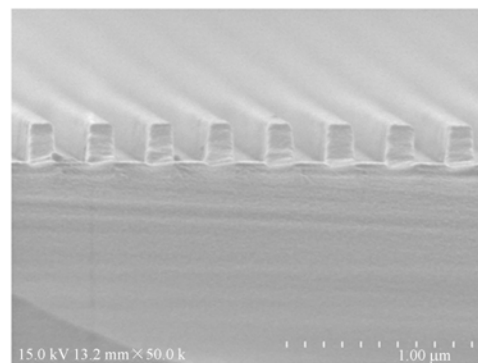
2.3 复合型透射脉冲压缩光栅的制作与测试

在制作透射式脉冲压缩光栅时,首先利用全息光刻技术制作光栅掩模,随后采用离子束刻蚀方法将光栅掩模转移至石英基底上。图 7(a)和 7(b)分别为离子束刻蚀制作完成后的 1 250 line/mm 和 3 300 line/mm 光栅的电子显微镜照片。

图 7(a)中制作的 1 250 line/mm 光栅微结构,侧壁具有一定的倾角,不严格是矩形,槽型具



(a)1 250 line/mm



(b)3 300 line/mm

图 7 熔石英光栅的 SEM 照片

Fig. 7 SEM images of fused silica grating

有梯形的特征,光栅的衍射效率与矩形有些差异。最后进行了衍射效率测量实验,在 TE 偏振下,入射角为 30°时,透射压缩光栅的-1 级透射衍射效率如表 1 所示。

表 1 1 250 line/mm 透射光栅的-1 级透射衍射效率
Tab. 1 Minus first order diffraction efficiencies of
1 250 line/mm transmission grating (%)

| λ/nm | 690 | 730 | 780 | 808 | 850 | 915 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Diffraction efficiency | 81.2 | 91.1 | 97.8 | 98.1 | 94.1 | 88.2 |

而 3 300 line/mm 高频增透光栅在 690,808,850,915 nm 波长(TE 偏振), 30° 入射角的测试条件下的透过率均大于 99.6%。

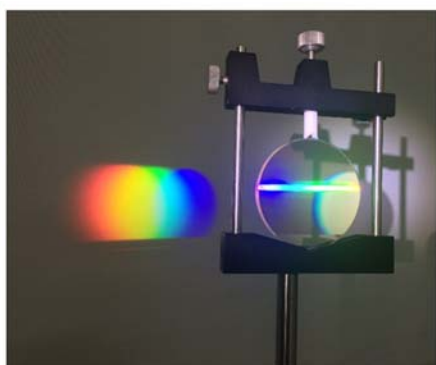


图 8 $\Phi 65 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 复合型熔石英光栅照片

Fig. 8 Photo of $\Phi 65 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ composite fused silica transmission grating

参考文献:

- [1] CANOVA F, CLADY R, CHAMBARET J P, *et al.*. High-efficiency, broad band, high-damage threshold high-index gratings for femto-second pulse compression[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(23):15324-15334.
- [2] MARTZ D H, NGUYEN H T, PATEL D, *et al.*. Large area high efficiency broad bandwidth 800 nm dielectric gratings for high energy laser pulse compression[J]. *Opt. Eng.*, 2009, 17(26):23809-23816.
- [3] PERRY M D, BOYD R D, BRITTEN J A, *et al.*

$\Phi 65 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 复合式熔石英透射光栅照片如图 8 所示。利用干涉仪测量复合式光栅的-1 级透射波前 0.08λ (@633 nm), 测试结果表明复合式光栅结构中高频增透光栅不产生额外的像差, 不存在镀膜应力形变的问题, 可以替代增透膜, 有助于减小光栅的衍射像差。

3 结 论

本文基于严格耦合波理论设计了宽带熔石英透射光栅。为降低光栅基底背面的反射损失, 用高频光栅结构代替传统的增透膜, 设计了高透过率增透光栅。深槽石英光栅与高频增透光栅集成在一片 $\Phi 65 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的熔石英基底上, 利用全息记录技术和离子刻蚀技术研制了新型复合式熔石英透射脉冲压缩光栅, 实测中心波长 Littrow 角下其衍射效率能够达到 98%(@808 nm)。实验结果表明, 新型复合式熔石英透射脉冲压缩光栅不仅能够有效提高能量利用率, 而且能够解决光栅镀制增透膜产生的应力形变问题, 适合制作大尺寸光栅。

- High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(8): 940-942.
- [4] NABEKAWA Y, TOASHI T, SEKIKAWA T, *et al.*. All-solid-state high-peak-power Ti:sapphire laser system above 5-kHz repetition rate [J]. *Applied Physics B*, 2000, 70(1):S171-S179.
- [5] NGUYEN H T, SHORE B W, BRYAN S J, *et al.*. High-efficiency fused-silica transmission gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(3):142-144.
- [6] ZHOU C, SEKI T, KITAMURA T, *et al.*. Wavefront analysis of high-efficiency, large-scale, thin transmission gratings[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5995-6008.

作者简介:



李朝明(1975—),男,江苏徐州人,博士,副研究员,2007年于苏州大学获得博士学位,主要从事光学设计,衍射光学器件制造方面的研究工作。E-mail: chaoming@suda.edu.cn