

# 纳秒激光刻蚀玻璃基质铬薄膜直写微光栅结构\*

张恒,周云,周雷,陈林森

(苏州大学 信息光学工程研究所,江苏 苏州 215006)

**摘要:**利用波长为 351 nm 的半导体泵浦全固态脉冲激光器,采用双光束干涉方法,对蒸镀在石英玻璃衬底上的铬薄膜直接刻蚀形成微光栅结构的方法进行了实验研究.通过实验,分析了激光能量和脉冲数与微光栅结构槽形和一级衍射效率之间的关系.利用光学显微镜和原子力显微镜检测分析光栅槽形,测得槽深为 253 nm 的最佳微光栅结构,并测得其在波长为 532 nm 的激光的一级衍射效率为 6.5%.结果表明:在激光能量为 1 150  $\mu\text{J}$  时,适当增加曝光脉冲数有利于提高制备光栅的槽深和一级衍射效率.

**关键词:**纳秒激光;微光栅结构;衍射效率;刻蚀

**中图分类号:**TN249;TH744.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2009)02-241-4

## 0 引言

高能量密度激光器的迅速发展,为激光直写技术在微米结构精密掩模、精密元件制造方面的应用提供动力.国内外许多科研工作者在聚合物、玻璃、金属等材料中展开了大量微加工实验研究<sup>[1-6]</sup>.利用单光束飞秒激光微加工方法可以获得微机械元件、光栅、光耦合器、光存储器等各种微结构<sup>[7-9]</sup>,利用聚焦的红外飞秒激光,胡晓等在玻璃基质金属薄膜上刻划出低频光栅<sup>[9]</sup>,控制光束聚焦的位置,赵全忠<sup>[10]</sup>、Takeshima<sup>[11]</sup>等进行了在透明材料内部诱导衍射光栅结构的实验研究.然而这些微结构的精细程度受到瑞利衍射的限制,为克服单光束微加工方法的缺点,科研工作者利用双光束或多光束干涉方法对材料进行微加工,并利用此方法制作了光栅和非线性晶体等微结构器件<sup>[12-15]</sup>.采用双光束干涉法, Li Yan,等在玻璃内部制作出平面光栅<sup>[16]</sup>. Cs. Vass 等在熔融石英上光制作出周期为 550 nm 的光栅<sup>[17]</sup>.采用多光束干涉, Toshiaki Kondo 等制作出了三维光子晶体<sup>[18]</sup>.

前人的研究主要是使用的短波长、准分子激光或飞秒激光,实验设备昂贵,对环境的要求比较高,难以工业化生产.本研究采用波长为 351 nm 的高功率半导体泵浦全固态脉冲激光器(Diode-Pumped Solid-State Laser, DPSSL)为光源,采用双光束干涉,直接在蒸镀在玻璃基底上的金属铬薄膜制作出周期为 1.01  $\mu\text{m}$ ,最大槽深为 253 nm 的微光栅结

构.分析了激光能量和脉冲数与微光栅结构槽形和一级衍射效率之间的关系.

## 1 实验

本文采用的纳秒激光干涉直写系统,如图 1.实验中采用 DPSSL 激光器作为光源,其波长 351 nm,脉冲宽度 20 ns,重复频率 1 kHz,光束口径 1 mm,输出功率 3W.光束经高损伤阈值分束棱镜 Beam Splitter 分成两束,两束光分别经镀全反射膜的直角棱镜 Prism 2, Prism 4 和 Prism 3 反射后形成平行光束,再由焦距为 50 mm 的聚焦透镜 Lens 将两束光聚焦于样品表面,焦点处焦斑直径约为 50  $\mu\text{m}$ .通

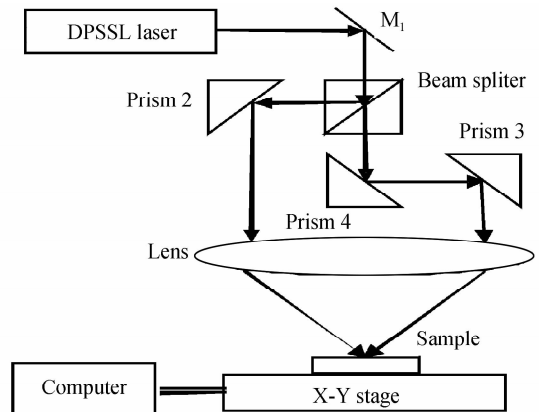


图 1 纳秒激光直写系统

Fig. 1 Setup of nanosecond laser interference direct writing system. The system uses a DPSSL laser as the light source. The laser beam is split into two beams by a beam splitter. One beam is reflected by Prism 2 and Prism 4, and the other by Prism 3. The two beams are then focused by a lens onto the sample surface. The X-Y stage is controlled by a computer.

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

式中  $\theta$  为双光束干涉角,  $d$  为光栅周期,  $\lambda$  为激光波长.

选择光束干涉角为  $10^\circ$ ,激光脉冲数分别为 1、

\* 国家自然科学基金(60777039)和国家 863 高技术研究发展计划(2006AA04Z318)资助  
Tel: 0512-65112711 Email: whitewall\_sz@yahoo.com.cn  
收稿日期: 2007-10-15

4、8、12、16, 调节激光器工作电流改变激光脉冲能量, 用激光能量计测量样品表面激光束脉冲能量在 250~1450  $\mu\text{J}$  (250, 550, 850, 1050, 1450) 变化, 使用金相显微镜进行表面形貌分析, 使用原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM) 进行三维形貌分析。

## 2 结果与讨论

通过数控方法控制二维移动平台的移动, 进行了由微光栅结构组成的点阵图案的刻蚀。纳秒激光刻蚀过后, 在金相显微镜下可以观察到刻蚀区域形成了光栅结构, 如图 2。刻蚀铬膜所需的最小激光能量是 250  $\mu\text{J}$ , AFM 测量光栅的最大槽深为 253 nm, 随着激光能量的增加光栅槽深逐渐增加, 后逐渐减少, 激光脉冲个数的增加使被除去的材料逐渐增加, 同时也会造成表面粗糙度的增加。

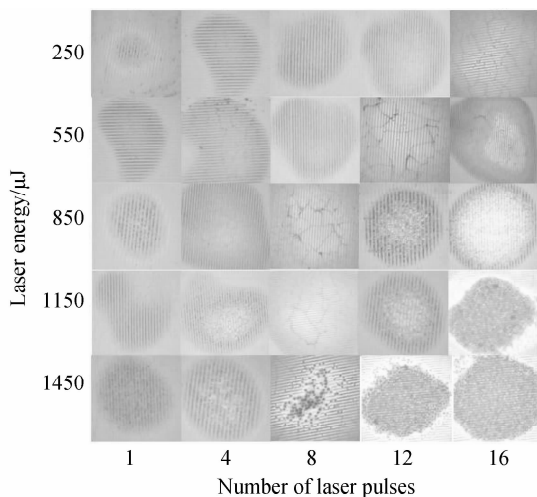


图 2 纳秒激光刻蚀微光栅结构

Fig. 2 Nanosecond laser etching micro-grating structures

图 3 为激光功率和激光脉冲个数对微光栅刻蚀槽深的影响曲线。实验中选择双光束干涉夹角为  $10^\circ$ , 利用式(1)计算光栅周期为 1  $\mu\text{m}$ , 通过改变激光器的泵浦电流改变激光器的输出能量, 同时改变同一点的刻蚀脉冲个数, 激光刻蚀后, 用 AFM 测得其光栅槽深在 10~253 nm 变化, 光栅周期为 1.01  $\mu\text{m}$ 。从图 3(a)可以看出, 由于激光能量呈高斯型分布, 随着激光能量的提高, 材料表面被汽化的成分增加, 在铬膜上得到的光栅槽深逐渐增大, 在四个脉冲、1150  $\mu\text{J}$  时, 达到最大值 253 nm; 激光脉冲功率继续增加, 相邻的光束相长区域的边缘相互叠加, 光斑的能量趋向均匀分布。受扩散热的影响, 光栅的峰顶被部分汽化除去, 光栅槽深下降, 最后因激光脉冲功率过大, 几乎将整个光栅区域汽化除去, 光栅结构被破坏。只有单脉冲的情况下, 光栅槽深一直呈上升趋势, 最后达到 190 nm。同样, 从图 3(b)可以

看出, 激光脉冲个数对光栅槽深也有类似的影响。低激光能量 (小于 1000  $\mu\text{J}$ ) 时, 脉冲个数增加, 有利于提高光栅的槽深; 高激光能量 (大于 1000  $\mu\text{J}$ ) 时, 增加脉冲个数, 有利于提高光栅的槽深, 但激光脉冲大于 8 个时, 光栅槽深反而下降到 50 nm。

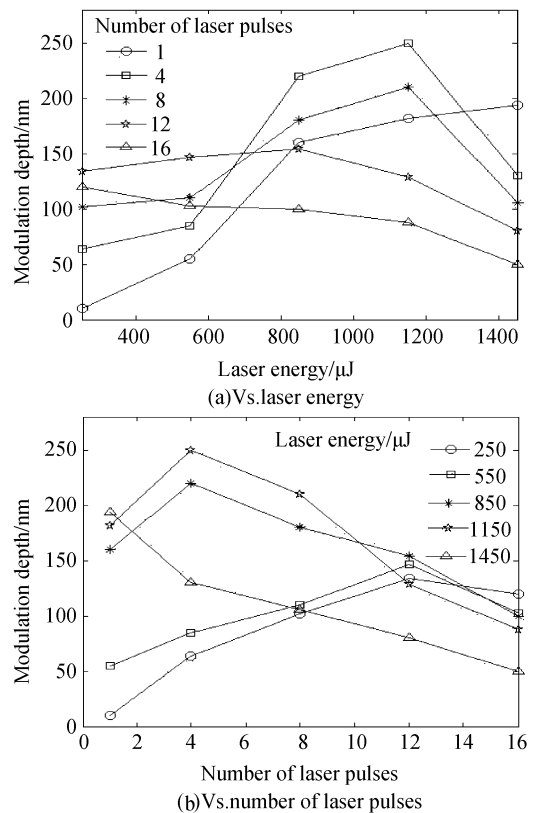


图 3 光栅槽深与激光能量和脉冲个数的关系

Fig. 3 The modulation depth of grating vs. laser energy and number of laser pulses

定义衍射效率为各级衍射斑的强度与入射到光栅的激光总强度之比。为测量光栅的衍射效率, 将一半导体泵浦全固态 532 nm 激光耦合到光栅, 用功率计测量出各光栅的一级衍射光的光强, 并用数码相机拍下其中一个光栅的衍射斑, 实验装置如图 4。测量比较不同条件下制备的微光栅结构的一级衍射效率, 研究了激光能量和激光脉冲个数对光栅衍射

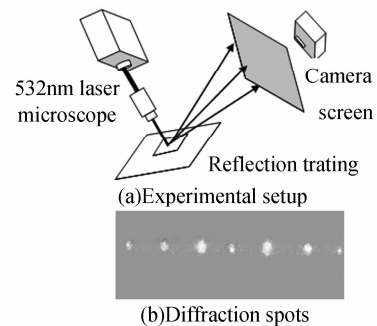


图 4 衍射测量装置和光栅衍射

Fig. 4 Experimental setup for measurement of diffraction and diffraction spots of grating

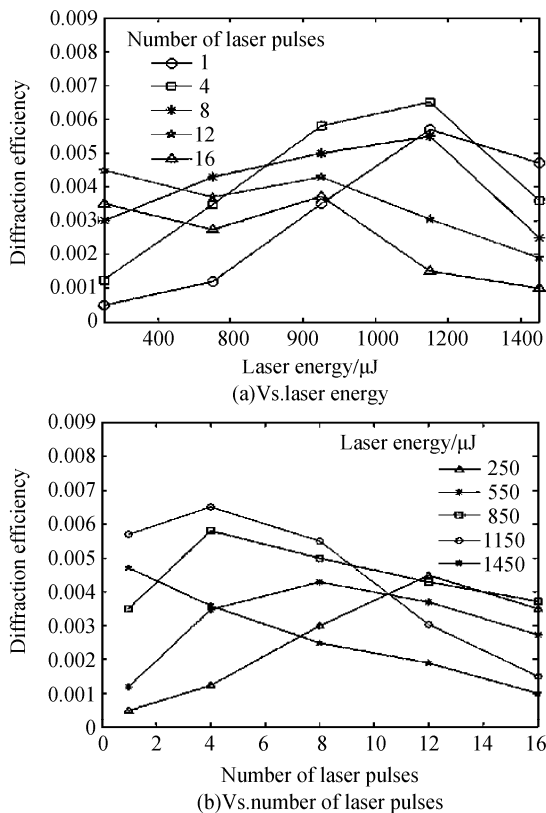


图5 光栅一级衍射效率与激光能量和脉冲个数的关系  
Fig. 5 First-order diffraction efficiency of grating vs. laser energy and number of laser pulses

效率的影响,测得其一级衍射效率最小值为0.5%,最大值为6.5%,如图5.

由光栅的衍射理论<sup>[19]</sup>,光栅第 $m$ 级衍射效率公式 $\eta = I_m/I_0 = N^2 \text{sinc}^2(ma/d)$ ,其中 $I_m$ 为第 $m$ 级衍射光的强度, $I_0$ 为入射光总强度, $N$ 为光栅区域中条纹总条数, $d$ 为光栅周期, $a$ 为光栅中未被刻蚀部分宽度.制备的光栅中 $a/d$ 约在0~1之间,在这个区间内, $\text{sinc}^2(x)$ 为单调递减函数.从图5(a)可以看出,相同的脉冲个数下,随着激光能量的提高,铬膜被烧蚀部分的宽度和深度增加,未被刻蚀部分宽度 $a$ 变小, $a/d$ 降低,单调递减函数 $\text{sinc}^2(a/d)$ 的值增加,铬膜上刻蚀得到的光栅一级衍射效率逐渐提高.在脉冲个数为4个,激光能量为1150 μJ时,测得最高衍射效率为6.5%.激光能量继续增加,相邻的光束相长区域的边缘相互叠加,光斑的能量趋向均匀分布,受热扩散的影响,铬膜被烧蚀部分急剧增加,光栅的峰顶被部分汽化除去,光栅结构被部分破坏,使得光栅区的表面形貌变粗糙,光栅槽深下降,未被刻蚀部分宽度 $a$ 变大, $a/d$ 降低,单调递减函数 $\text{sinc}^2(a/d)$ 的值减小,铬膜上刻蚀得到的光栅一级衍射效率逐渐降低.

从图5(b)可以看出,相同的激光能量下,随着脉冲个数的增加,在激光脉冲的重复作用下,铬膜被烧蚀部分的宽度和深度增加,未被刻蚀部分宽度 $a$

变小, $a/d$ 降低,单调递减函数 $\text{sinc}^2(a/d)$ 的值增加,铬膜上刻蚀得到的光栅一级衍射效率逐渐提高.但是在较高激光能量下,相邻的光束相长区域的边缘相互叠加,光斑的能量趋向均匀分布,激光脉冲个数增加,受热扩散的影响,不仅使得光栅区的表面形貌变粗糙,而且使光栅的峰顶被部分汽化除去,造成光栅槽深下降,未被刻蚀部分宽度 $a$ 变大, $a/d$ 增加,单调递减函数 $\text{sinc}^2(a/d)$ 的值减小,铬膜上刻蚀得到的光栅一级衍射效率降低.如激光能量为1450 μJ时,一级衍射效率一直呈下降趋势.

### 3 结论

利用纳秒激光双光束干涉的方法开展了在石英玻璃衬底的铬薄膜表面刻蚀微光栅结构的工作.在铬材料表面得到了微米量级线宽的光栅,分析了激光能量和脉冲个数对微光栅结构槽形和一级衍射效率之间的影响,并简要分析了原因.纳秒激光的各种参量的可控性使得光栅的制备更加灵活,精密.该研究为在金属材料表面制作反射型微光栅结构提供了一种新方法,并拓展了纳秒激光在诱导微结构方面的应用,同时该制作过程无需掩模,可根据需要随时调整光栅周期,简化了工艺步骤,减少了加工成本,提高了加工准确度和灵活性,有进一步研究和发展的价值.

#### 参考文献

- [1] LI Zhen, CAI Zhi-gang, CHEN Zhen-qiang, *et al.* Study of photo induced microstructure in azobenzene polymer films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3):416-420.  
李真,蔡志岗,陈振强,等.偶氮苯聚合物薄膜光致微结构的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3):416-420.
- [2] CHENG Guang-hua, WANG Yi-shan, ZHAO Wei, *et al.* Structural characteristics induced by nanosecond, picosecond, and femtosecond laser pulse in sapphire[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8):1121-1125.  
程光华,王屹山,赵卫,等.不同宽度脉冲激光对白宝石损伤的结构特征[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8):1121-1125.
- [3] ZHANG Dong-qing, WANG Xiang-zhao, SHI Wei-jie. An in-situ method for measuring the wafer flatness [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12):1975-1979.  
张冬青,王向朝,施伟杰.光刻机硅片表面不平度原位检测技术[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12):1975-1979.
- [4] YA Cheng, SUGIOKA K, MASUDA M, *et al.* Optical gratings embedded in photosensitive glass by photochemical reaction using a femtosecond laser[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(15):1809-1816.
- [5] TRELENBERG T W, DINH L N, STUART B C, *et al.* Femtosecond pulsed laser ablation of metal alloy and semiconductor targets[J]. *Appl Sur Sci*, 2004, **229**(1-4):268-274.
- [6] LI Peng, YANG Tai-ping, LI Sheng, *et al.* Direct laser

- fabrication of nickel alloy samples[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, **45**(11):1288-1294.
- [7] NAESSENS K, OTTEVAERE H, van DAELE P, *et al.* Flexible fabrication of microlenses in polymer layers with excimer laser ablation[J]. *Appl Sur Sci*, 2003, **208-209**: 159-164.
- [8] GONG Ying, JIANG Zhong-wei, ZHOU Yong-jun, *et al.* Status and principle of two-photon microfabrication using femtosecond laser[J]. *Opt Technique*, 2004, **30**(5):688-698.  
龚莹, 蒋中伟, 周拥军, 等. 飞秒激光双光子微细加工技术及研究现状[J]. 光学技术, 2004, **30**(5):688-698.
- [9] HU Xiao, ZHAO Quan-zhong, JIANG Xiao-wei, *et al.* Inscribing diffraction grating by femtosecond laser ablation of metal film on glass substrate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(1):17-20.  
胡晓, 赵全忠, 姜雄伟, 等. 飞秒激光烧蚀玻璃基质金属薄膜直写衍射光栅[J]. 中国激光, 2006, **33**(1):17-20.
- [10] ZHAO Quan-zhao, QIU Jian-rong, JIANG Xiong-Wei, *et al.* Fabrication of internal diffraction gratings in calcium fluoride crystals by a focused femtosecond laser[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(5):742-746.
- [11] TAKESHIMA N, NARITA Y, TANAKA S, *et al.* Fabrication of high-efficiency diffraction gratings in glass[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(4):352-354.
- [12] VENKATAKRISHNAN K, SIVAKUMAR N R, TAN B. Fabrication of planar gratings by direct ablation using an ultrashort pulse laser in a common optical path configuration [J]. *Appl Phys*, 2003, **76**(2):143-146.
- [13] HIRANO M, KAWAMURA K, HOSONO H. Encoding of holographic grating and periodic nano-structure by femtosecond laser pulse [J]. *Appl Sur Sci*, 2002, **197-198**: 688-698.
- [14] VHAUVY P F, HOFFMANN P, LANDOLT D. Applications of laser lithography on oxide film to titanium micromachining [J]. *Appl Sur Sci*, 2003, **208-209**:165-170.
- [15] SUN Xiao-hui, ZHOU Chang-he. Fabrication of microoptical elements with femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(1):133-137.  
孙晓慧, 周常河. 飞秒激光加工微光学元件的研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(1):133-137.
- [16] LI Y, WATANABE W, YAMADA K, *et al.* Holographic fabrication of multiple layers of grating inside soda-lime glass with femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **80**(9):1508-1510.
- [17] VASS C, OSVAY K, CSETE M, *et al.* Fabrication of 550 nm grating in fused silica by laser induced backside wet etching technique[J]. *Appl Sur Sci*, 2007, **253**(19):8059-8063.
- [18] KONDO T, MASTSUO S, JOUDKAZIS S, *et al.* Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **79**(6):725-727.
- [19] YANG Jia-min, DING Yao-nan, CAO Lei-feng, *et al.* Study on transmission grating diffraction efficiencies [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6):723-726.  
杨家敏, 丁耀南, 曹磊峰, 等. 透射光栅衍射效率研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(6):723-726.

## Fabrication of Micro-grating Structures by Nanosecond Laser Ablation of Chrome Film on Glass Substrate

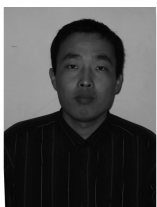
ZHANG Heng, ZHOU Yun, ZHOU Lei, CHEN Lin-sen

(Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Received date: 2007-10-15

**Abstract:** A method of etching micro-grating structures (MGSs) by ablating chrome film on glass was investigated, which was used the interference laser of 351 nm diode-pumped solid-state laser (DPSSL) pulses. Through changing the experimental parameters such as laser power, number of laser pulses, the influences of these parameters on the depth of grooves and diffraction efficiency of MGSs were analyzed. Measured by conventional optical microscopy and atomic force microscopy (AFM), the highest depth of MGSs is 1.01  $\mu\text{m}$ . The first-order diffraction efficiency of the MGSs was measured using 532 nm laser, and the highest of which was 6.5%. The experimental results show that increasing the number of laser pulses properly in proper laser energy, the depth of grooves and diffraction efficiency are increased.

**Key words:** Nanosecond laser; Micro-grating structure; Diffraction efficiency; Ablation



**ZHANG Heng** was born in 1979. He received the M. S. degree from South China Normal University in 2005. Now he is a Ph. D. degree candidate in optical engineering at Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, and his research interests focus on investigation of laser-material interaction, laser ablation and art investigation of laser material processing.