

文章编号: 0258-7025(2008)03-0448-04

# 用纳秒激光在镜面不锈钢表面刻蚀微光栅结构

张 恒 周 云 方宗豹 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 研究了利用波长为 532 nm 的激光二极管抽运全固态激光器(DPSSL),采用双光束干涉手段,在镜面不锈钢表面直接刻蚀形成微光栅结构(MGS)的方法。通过实验,分析了激光功率、光束口径、双光束干涉角与光栅槽深和占宽比之间的关系。利用光学显微镜和原子力显微镜(AFM)对实验结果的检测分析表明,在激光功率为 45 mW,双光束干涉角为 20°的条件下,得到光栅周期为 1.34 μm,槽深为 300 nm 的最佳微光栅结构。同时,在适当激光功率下,增加光栅周期,增加光束口径都能提高光栅槽深。

**关键词** 激光技术;纳秒激光;微光栅结构;刻蚀;镜面不锈钢

**中图分类号** TN 249;TG 665 **文献标识码** A

## Fabrication of Micro-Grating Structure on Glazed Stainless-Steel by Nanosecond Laser

Zhang Heng Zhou Yun Fang Zhongbao Chen Linsen

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

**Abstract** A method of etching micro-grating structures (MGSs) on the surface of glazed stainless-steel directly was investigated, and a 532 nm diode-pumped solid-state laser (DPSSL) was used. The influences of the experimental parameters such as laser power, source beam diameter and period of grating, on the depth of grooves and duty cycle of MGSs were analyzed. The results were concluded and analyzed with conventional optical microscopy and atomic force microscopy (AFM). When the laser power and cross angle are 45 mW and 20° respectively, the best MGSs are obtained with 1.34 μm in period and 300 nm depth. Meanwhile, either increasing the grating period or the source beam diameter can enhance the depth of grooves.

**Key words** laser technique; nanosecond laser; micro-grating structure; etch; glazed stainless-steel

### 1 引 言

脉冲激光微加工技术已广泛应用于材料加工领域。21 世纪初,国内外研究者利用飞秒脉冲激光对聚合物、玻璃、金属及激光二极管等材料进行了大量的微加工实验研究<sup>[1~4]</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>[1,2,5,6]</sup>,然而这些微结构的精细程度受到瑞利衍射的限制。为了克服单光束微加工方法的缺点,科研工作者利用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>[7~10]</sup>。另外利用聚焦的红外飞

秒激光,控制光束聚焦的位置,进行了在透明材料内部诱导衍射光栅结构的实验研究<sup>[2,7,8]</sup>。

本文采用波长为 532 nm 的高功率激光二极管抽运全固态纳秒激光器(DPSSL)为光源,通过计算机控制激光器发射适当功率的激光脉冲,利用双光束干涉方法,直接在镜面不锈钢表面刻蚀出微光栅结构(MGS),克服了单光束直写方法受瑞利衍射的限制。并通过实验方法,分析了激光功率、光束口径、双光束干涉角对直写的光栅槽深以及占宽比之间的关系。另外,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光学衍射图

收稿日期:2007-05-22;收到修改稿日期:2007-09-06

作者简介:张 恒(1979—),男,山东人,博士研究生,主要从事纳秒激光与物质相互作用方面的实验与工艺研究。

E-mail: whitewall\_sz@yahoo.com.cn

导师简介:陈林森(1961—),男,江苏人,研究员,博士生导师,目前从事光信息处理、衍射光学器件、数码激光图像三维照排系统及相关软件、光变图像、光存储系统、数码全息技术等的研究与开发。E-mail: lschen@holomaker.com

像<sup>[11~13]</sup>的刻蚀。

### 2 实验装置

纳秒激光干涉直写系统如图 1 所示。实验中采用激光二极管抽运全固态激光器作为光源,其波长为 532 nm,脉冲宽度 20 ns,重复频率 1 kHz,光束口径 1 mm,输出功率 3 W。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 的聚焦透镜将两束光聚焦于样品表面,焦点处焦斑直径约为 64 μm。通过调节精密螺杆(精度为 0.02 mm),调整反射镜 Prism 2 与 Prism 3 之间的距离,实现两束光在空间上的相干,同时使两入射光束的干涉角在 6°~30°之间变化。光栅周期在 0.8~5.0 μm 之间变化时可计算为

$$\begin{cases} \theta = 2\arctan \frac{d}{2f} \\ 2d\sin \frac{\theta}{2} = \lambda \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\theta$  为双光束干涉角,  $f$  为透镜的焦距,  $d$  为光栅周期,  $\lambda$  为激光波长。

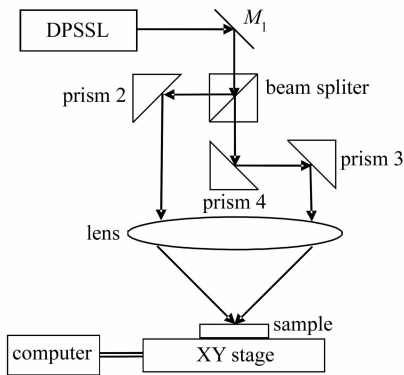


图 1 纳秒激光直写系统示意图  
Fig.1 Schematic setup of nanosecond laser interference direct writing

### 3 实验结果与讨论

选择激光功率为 40 mW,光束干涉角为 22°,样品为经过镜面抛光的镜面不锈钢,光洁度 PV 值小于 10 nm。每个脉冲在样品表面刻蚀出一个类似圆形的微光栅结构区域,如图 2 所示。(a)为光学显微镜观察到的光栅区域,直径约为 60 μm,光栅条纹清晰。利用原子力显微镜(AFM)检测微光栅结构,结果如图 2(b)和(c)所示,图中光栅槽深、周期和占宽比分别为 300 nm, 1.24 μm 和 0.55,光栅条纹清晰。

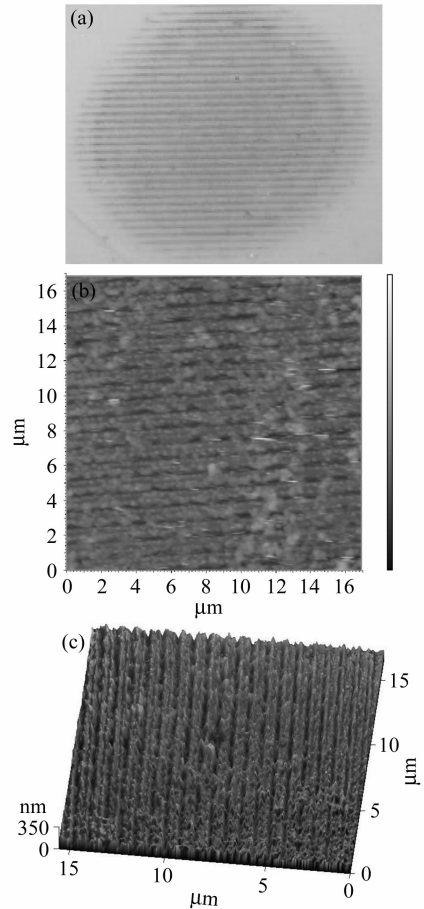


图 2 刻蚀得到的微光栅结构。(a) 光学显微镜,(b) 二维原子力显微镜和(c) 三维原子力显微镜的结果  
Fig.2 Nanosecond laser etching MGS. (a) optic microscope measuring result; (b) two-dimensional (2D) AFM scanning result; (c) three-dimensional (3D) AFM scanning result

但是加工线条的边缘质量较差,且有云雾状烟尘,光栅槽形也不是理论上的正弦形,这是材料表面不均匀和原子溅射引起的。

激光功率对微光栅的刻蚀槽深和占宽比的影响曲线如图 3 所示。实验中选择光束干涉角为 20°。通过改变激光器的工作电流改变激光器的输出功率,设定为 17.2~18.8 A,每改变 0.2 A 进行一次实验。当材料表面脉冲激光功率密度小于不锈钢的刻蚀阈值时,不锈钢表面几乎不能观察到周期性条纹结构,只有轻微的热影响痕迹;当大于刻蚀阈值时,表面开始出现条纹结构,随着激光脉冲功率的逐渐增大,不锈钢表面被气化的部分增加,条纹深度逐渐增大,占宽比减小;激光脉冲功率继续增加,受扩散热的影响,光栅的峰顶被部分气化除去,光栅槽深下降,占宽比增大,最后因激光脉冲功率过大,受扩散热影响,几乎将整个区域气化除去,光栅结构被破坏。

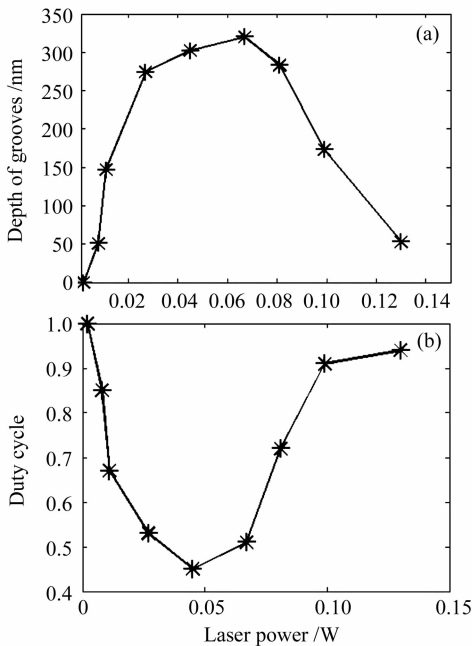


图 3 激光功率对微光栅形状的影响。(a) 激光功率对刻蚀槽深的关系曲线；(b) 激光功率对微光栅占宽比的影响曲线

Fig. 3 Influences of laser power to the shape of MGSs. (a) depth of grooves of MGSs measured at different laser power; (b) duty cycle of the MGSs measured at different laser power

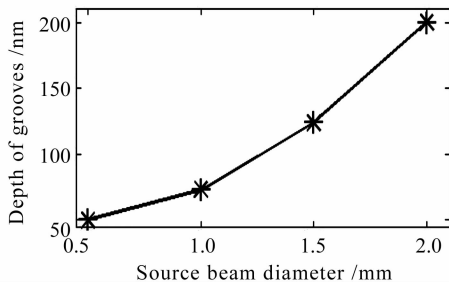


图 4 光束口径与刻蚀槽深的关系曲线

Fig. 4 Depth of grooves measured at different source beam diameter of laser

图 4 是光束口径与光栅槽深的关系曲线。这组实验中激光功率和干涉角分别为 45 mW 和  $20^\circ$ ，在反射镜  $M_1$  前增加扩束系统（扩束比 1:3）和可调圆形光阑，改变光阑的通光直径，分别设定为 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm。刻蚀后，测得其光栅槽深分别为 50 nm, 73 nm, 134 nm 和 203 nm。随着光束口径的增加，光栅槽深逐渐增加。这种现象可以解释如下：由透镜聚焦所成的中心艾里斑直径  $\phi$  计算公式

$$\phi = 1.22\lambda f/D, \quad (2)$$

式中  $D$  为光束口径，可知，艾里斑直径与光束口径

成反比关系。同样激光脉冲功率下，光束口径大，则艾里斑直径小，单位面积上的光密度大，刻蚀光栅槽深大。

光栅周期对光栅刻蚀深度的影响曲线如图 5 所示。改变两光束干涉角后得到不同空频的微光栅结构，调整两个反射棱镜 Prism2 和 Prism3，使得两平行光束的距离为 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm，由式(1)，相应的光栅周期分别为  $5.32 \mu\text{m}$ ,  $2.67 \mu\text{m}$ ,  $1.79 \mu\text{m}$  和  $1.36 \mu\text{m}$ 。从图 5 可以看出，随着光栅周期的增大，光栅的刻蚀深度增大，由于脉冲功率固定，随着光栅周期  $d$  的增大，微光栅区域的凹刻槽数目减少，每个凹槽所受激光功率增大，因此凹槽的刻蚀深度增大。

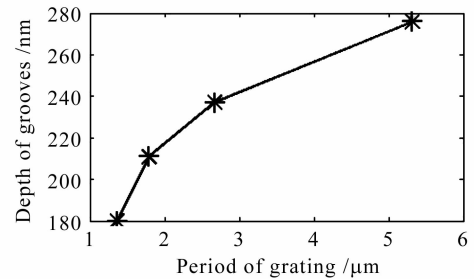


图 5 光栅周期与槽深的关系

Fig. 5 Depth of grooves measured at different period of grating

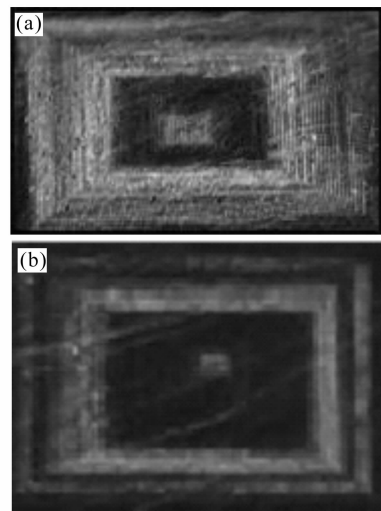


图 6 刻蚀数字衍射光学图像的效果图

Fig. 6 Digital diffraction optical imaging fabricated by laser directing writing

另外，利用该系统进行数字衍射光学图像刻蚀实验，成功制作出具有 22 个微光栅取向、尺寸为  $4.2 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$  的光学图像，如图 6 所示，两图在不同角度入射光照射下获得，(b) 是在 (a) 的基础上旋转  $90^\circ$  的衍射效果。图像的衍射效果接近制作在

光刻胶干板上图像的衍射效果。若将光栅的槽深控制在 200~400 nm 之间, 占宽比在 0.45~0.55 之间, 选用高硬度的金属镜面材料刻蚀光学图形, 就可以用来制作纳米压印的模板, 直接应用于纳米压印生产。

## 4 结 论

采用纳秒激光双光束干涉的方法直接在镜面不锈钢表面刻蚀微光栅结构。由于纳秒激光的高能量, 单个激光脉冲即可刻蚀出微光栅结构, 从而使得刻蚀的热影响降低到最小。实验研究了纳秒激光各种参数的改变对光栅的槽深和占宽比的影响, 并简要分析了原因。同时通过在此基础上制作光变衍射图案, 给出了一种制备纳米压印模板的新方法, 这种方法与传统方法相比的优点是提高模板使用寿命, 减少工艺流程, 生产效率高, 有进一步研究和发展的价值。

## 参 考 文 献

- 1 K. Naessens, Heidi Ottevaere, P. Van Daele *et al.*. Flexible fabrication of microlenses in polymer layers with excimer laser ablation [J]. *Applied Surface Science*, 2003, **208-209**:159~164
- 2 Yan Li, Wataru Watanabe, Kazuhiro Yamada *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
- 3 P.-F. Chauvy, P. Hoffmann, D. Landolt. Applications of laser lithography on oxide film to titanium micromachining [J]. *Applied Surface Science*, 2003, **208-209**:165~170
- 4 A. Bensaoula, C. Boney, R. Pillai *et al.*. Arrays of 3D micro-columns generated by laser ablation of Ta and steel: modelling of a black body emitter [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **79**(4-6):973~975
- 5 Gong Ying, Jiang Zhongwei, Zhou Yongjun *et al.*. Status and principle of two-photon microfabrication using femtosecond laser [J]. *Optical 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
- 6 Hu Xiao, Zhao Quanzhong, Jiang Xiaowei *et al.*. Inscribing diffraction grating by femtosecond laser ablation of metal film on glass substrate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):17~20  
胡 晓, 赵全忠, 姜雄伟 等. 飞秒激光烧蚀玻璃基金属薄膜直写衍射光栅[J]. 中国激光, 2006, **33**(1):17~20
- 7 Quanzhao Zhao, Jianrong Qiu, Xiongwei Jiang *et al.*. Fabrication of internal diffraction gratings in calcium fluoride crystals by a focused femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5):742~746
- 8 Nobuhito Takeshima, Yoshihiro Narita, Shuhei Tanaka *et al.*. Fabrication of high-efficiency diffraction gratings in glass [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4):352~354
- 9 K. Venkatakrishnan, N. R. Sivakumar, B. Tan. Fabrication of planar gratings by direct ablation using an ultrashort pulse laser in a common optical path configuration [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **76**(2):143~146
- 10 Masahiro Hirano, Ken-ichi Kawamura, Hideo Hosono. Encoding of holographic grating and periodic nano-structure by femtosecond laser pulse [J]. *Applied Surface Science*, 2002, **197-198**(30):688~698
- 11 Chen Linsen, Xie Jianfeng, Lu Zhiwei *et al.*. Digital diffraction optical variable image device storage system and its applications [J]. *Optical Technique*, 2004, **31**(1):11~16  
陈林森, 解剑锋, 陆志伟 等. 一种新型数字化衍射光变图像的存储系统[J]. 光学技术, 2004, **31**(1):11~16
- 12 Chen Linsen, Shen Yan, Jie Jianfeng *et al.*. The method of making digital 3D optically variable device and its system [P]. Chinese Patent, 2001, No. 01134159. 9  
陈林森, 沈 雁, 解剑锋 等. 数码三维与光变图像的制作方法及其激光照排系统[P]. 中国专利, 2001, No. 01134159. 9
- 13 Fan Li, Chen Linsen. A method for holographic storage using optical variable device laser printing system [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **34**(4):297~299  
樊 莉, 陈林森. 一种利用光变图像光刻系统的存储方法[J]. 激光与红外, 2003, **34**(4):297~299