

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0415-04

# 飞秒激光在微加工中的应用

高飞<sup>1</sup>, 袁孝<sup>1\*</sup>, 程光华<sup>2</sup>, 赵卫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068

**摘要** 采用波长 800 nm, 脉冲宽度 150 fs, 脉冲重复率 1 kHz 的飞秒激光, 研究了在不同物质以及不同加工条件下的微加工特性, 在镀金薄膜和镀银薄膜上获得了近衍射极限的刻线加工尺度, 在半导体 GaAs 材料上制备了直径 3  $\mu\text{m}$  的 4 $\times$ 4 点阵。在加工速度为 400  $\mu\text{m/s}$  的条件下, 在 ZK6 玻璃和 LaF<sub>2</sub> 玻璃上制备了透射式衍射光栅, 光栅常数分别为 2.5  $\mu\text{m}$  和 5  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 超快光学; 飞秒激光; 微加工; 镀金薄膜; 镀银薄膜; 光栅

**中图分类号** TG665 **文献标识码** A

## Applications of Femtosecond Laser Micromachining

GAO Fei<sup>1</sup>, YUAN Xiao<sup>1</sup>, CHENG Guang-hua<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710068, China

**Abstract** The 800 nm, 150 fs, 1 kHz femtosecond laser micromachining for different materials under different processing conditions is studied. The diffraction-limited cutting on the gold and silver films is obtained, respectively. A 4 $\times$ 4 array holes with the diameter of 3  $\mu\text{m}$  are drilled in the GaAs materials. The transmission gratings with the grating constant of 2.5  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$  are fabricated into the ZK6 and LaF<sub>2</sub> glasses at the machining speed of 400  $\mu\text{m/s}$ .

**Key words** ultrafast optics; femtosecond laser; micromachining; gold film; silver film; grating

## 1 引言

飞秒激光烧蚀具有较低的损伤阈值、有限的热影响区域和较高的加工精度, 在激光微加工领域具有重要的应用价值<sup>[1~3]</sup>。由于飞秒激光脉冲持续时间短, 远小于材料中受激电子的能量释放时间, 从而减小了热扩散的影响, 限制了热影响区, 实现了相对意义上的“冷”加工, 大大减弱和消除了传统加工中热效应带来的负面影响。

飞秒激光微加工的另一个优点在于加工材料的广泛性<sup>[4~6]</sup>。传统的连续激光和长脉冲激光的加工对象有一定的范围限制, 一般金属材料较易加工, 绝缘材料特别是透明材料、脆性材料和高硬度材料等的加工受到很大限制。传统的机械或激光方法很容

易引发化学反应而导致大范围的破坏甚至造成爆炸, 很难对烈性材料进行加工, 而飞秒激光的作用过程中对周围材料影响很小, 可以对烈性材料等进行安全加工<sup>[7]</sup>。

本文研究了飞秒激光对不同物质在不同加工条件下的微加工特性, 包括在镀金薄膜、镀银薄膜、半导体 GaAs 等材料上打孔和刻线; 在 ZK6 玻璃和 LaF<sub>2</sub> 玻璃上制备透射式衍射光栅, 展示了飞秒激光在材料微加工领域的广阔应用前景。

## 2 实验装置

图 1 为飞秒激光材料微加工实验装置示意图, 实验采用的飞秒脉冲激光参数为: 脉冲宽度 150 fs,

**作者简介:** 高飞(1981—), 男, 华中科技大学激光技术国家重点实验室硕士研究生, 主要从事飞秒激光材料微加工方面的研究。

\* 通信联系人。E-mail: xyuan@mail.hust.edu.cn

波长 800 nm, 脉冲重复率 1 kHz, 最大单脉冲能量 50  $\mu\text{J}$ 。激光脉冲经过中性衰减片后, 使用倍率为 50 倍、数值孔径为 0.55 的显微物镜将激光光束聚焦到待加工材料的指定位置, 待加工材料样品放置在一个三维步进式精密移动平台上, 移动平台在 X, Y, Z (垂直于水平面的方向) 方向的步长分别为 100 nm, 125 nm 和 7 nm。实验中选择的待加工材料分别为镀金薄膜, 镀银薄膜, 半导体 GaAs, ZK6 玻璃和  $\text{LaF}_2$  玻璃等, 实验全部是在大气条件下进行的。

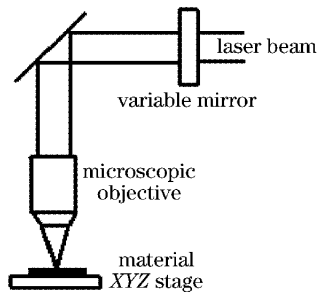


图1 飞秒激光微加工实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for fs laser micromachining

### 3 金属薄膜的打孔与刻线

#### 3.1 打孔

在金属微加工方面, 主要研究了飞秒激光在镀金薄膜和镀银薄膜上的打孔和刻线。为了保证材料的损伤较小, 并获得近衍射极限的加工尺度, 通常使激光的强度略高于烧蚀阈值, 或者使激光脉冲的峰值强度略高于烧蚀阈值以获得纳米级的尺度。在激光能量为 30 nJ 时, 使用倍率为 50 倍、数值孔径为 0.55 的显微物镜将飞秒激光脉冲聚焦到金属薄膜的表面, 进行阵列打孔。在激光的峰值功率密度和平均功率密度分别为  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  和  $1.2 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$  时, 在镀金薄膜和镀银薄膜上加工了  $4 \times 4$  的点阵孔, 如图 2 所示。用 50 倍光学显微镜对阵列进行了分析,

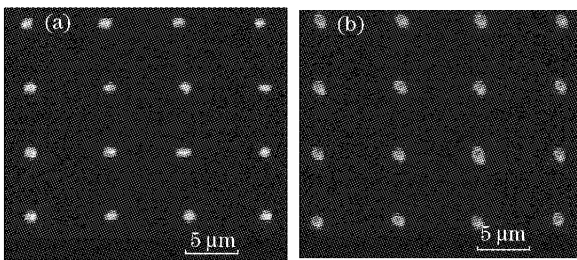


图2 飞秒激光脉冲能量为 30 nJ 时在金属薄膜上加工阵列孔。(a) 镀金薄膜; (b) 镀银薄膜

Fig. 2 Holes array drilled on gold film (a) and silver film (b) with fs laser pulses with the pulse energy of 30 nJ

从图 2 可以看出, 在镀金薄膜和镀银薄膜上获得的点阵的加工尺度分别为 1  $\mu\text{m}$  和 1.5  $\mu\text{m}$ , 接近 800 nm 波长的衍射极限, 并且孔内和周围几乎没有残留的微粒。而纳秒级脉冲激光加工, 孔周围的热影响区域面积大于光斑大小, 而且边缘会出现大量的熔化物质<sup>[8]</sup>。

#### 3.2 刻线

为了获得高精度的刻线加工, 需要激光的峰值强度略高于材料烧蚀阈值, 但是为了保证一定的加工速度, 则需要有较高的激光强度, 通常根据需要进行折中选取激光的参数。在加工速度为 400  $\mu\text{m/s}$  的条件下, 使用倍率为 50 倍、数值孔径为 0.55 的显微物镜聚焦激光束, 在峰值功率密度和平均功率密度分别为  $1.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  和  $2.4 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$  时, 在镀银薄膜表面进行了刻线实验研究。用 50 倍光学显微镜分析的结果如图 3 所示, 刻线宽度为 6  $\mu\text{m}$ , 刻线内部没有熔化物质的沉淀, 仅在刻线边缘存在少量残渣物质。

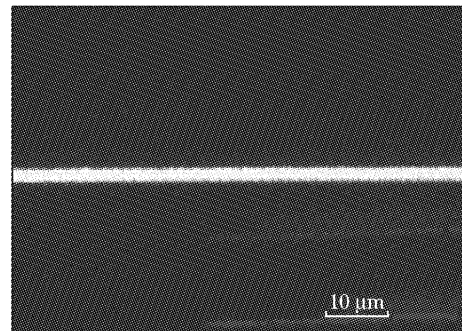


图3 镀银薄膜表面刻线

Fig. 3 Groove cut on the silver film

### 4 半导体 GaAs 材料的打孔与刻线

#### 4.1 打孔

在 GaAs 衬底上制作集成电路 (IC), 寄生电容低, 易进行器件隔离, 提高 IC 速度, GaAs IC 的性能和微加工技术密切相关。飞秒激光脉冲持续时间短, 在加工半导体 GaAs 材料时可以避免机械损伤, 并且热影响区域小, 加工质量优异。

在激光能量为 20 nJ 和 30 nJ 时, 使用倍率为 50 倍、数值孔径为 0.55 的显微物镜将飞秒激光脉冲聚焦到半导体 GaAs 材料表面, 此时激光峰值功率密度分别为  $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  和  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ , 对应的平均功率密度分别为  $8.1 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$  和  $1.2 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ , 在半导体 GaAs 材料上加工了  $4 \times 4$  的点阵孔。用 50 倍光学显微镜对阵列进行了分析, 如

图4所示,可以看出在峰值功率密度为  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  时,点阵的加工尺度为  $4 \mu\text{m}$ ,孔的周围由于热影响区域变大导致产生了一圈沉积物;而在峰值功率密度为  $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  时,点阵的加工尺度为  $3.5 \mu\text{m}$ ,孔的边缘仅存在较少的熔化沉积物,更加精密的微加工实验研究还在进一步进行中。

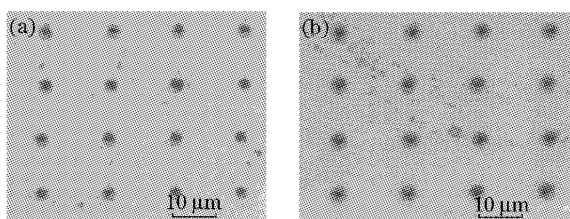


图4. 不同能量的飞秒激光脉冲在半导体 GaAs 材料上制备的阵列孔结构。(a) 20 nJ; (b) 30 nJ

Fig. 4 Holes array drilled on GaAs with fs laser of different pulse energy. (a) 20 nJ; (b) 30 nJ

## 4.2 刻线

由于刻线的宽度与激光能量密度成正比,与加工速度成反比,在实际刻线过程中,要适当调节激光能量密度和加工速度获得所需要的刻线宽度。在加工速度为  $40 \mu\text{m/s}$  的条件下,使用倍率为 50 倍、数值孔径为 0.55 的显微物镜将能量为 20 nJ 和 30 nJ 激光束聚焦到半导体 GaAs 材料的表面,进行了刻线,此时激光峰值功率密度分别为  $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  和  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ,对应的平均功率密度分别为  $8.1 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$  和  $1.2 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 。对实验结果采用 50 倍光学显微镜进行了分析,如图 5 所示。从图 5 中可以观察到,在峰值功率密度为  $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  和  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  时,刻线宽度分别为  $4 \mu\text{m}$  和  $7 \mu\text{m}$ 。在峰值功率密度为  $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  时,切线周围比较干净,仅有飞溅的残留物质;而在峰值功率密度为  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  时,切线周围明显开始出现飞溅物质,刻线的深度也随着加深。要实现高质量和高精度的刻线,激光峰值功率密度要尽量接近于材料

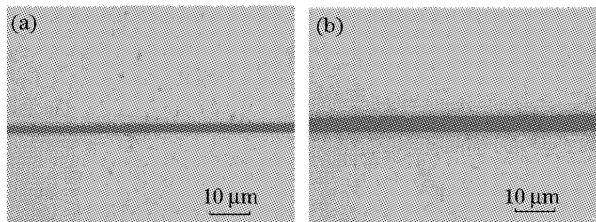


图5 不同能量的飞秒激光脉冲在半导体 GaAs 材料表面的刻线结构。(a) 20 nJ; (b) 30 nJ

Fig. 5 Grooves cut on GaAs with fs laser pulses of different pulse energy. (a) 20 nJ; (b) 30 nJ

的烧蚀阈值,同时还需要光束自动聚焦系统。

## 5 在 ZK6 玻璃和 LaF<sub>2</sub> 玻璃上制备光栅

利用飞秒激光与透明材料的非线性相互作用,可以在透明材料上制备光栅<sup>[9]</sup>。在加工速度一定时,激光能量密度越低,刻线宽度越窄;激光能量密度不变时,加工速度越快,刻线宽度越窄<sup>[10]</sup>,因此在实际制备过程中,为了保证刻线的连续性,需要适当调节激光能量密度和加工速度。使用中性衰减片将激光能量调节至 100 nJ,经过倍率为 50 倍、数值孔径为 0.55 的显微物镜将飞秒激光脉冲聚焦到样品表面以下  $70 \mu\text{m}$  处,对应的峰值功率密度和平均功率密度分别为  $2.7 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  和  $4.1 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ ,实验中使用的样品材料分别为 ZK6 玻璃和 LaF<sub>2</sub> 玻璃,待加工样品沿着垂直于激光光束入射方向以  $400 \mu\text{m/s}$  速度匀速移动。在 ZK6 玻璃上制备出了双周期衍射光栅,即具有两个光栅常量,分别为  $2.5 \mu\text{m}$  和  $5 \mu\text{m}$ ,如图 6(a) 所示;在 LaF<sub>2</sub> 玻璃上制备出了光栅常量为  $5 \mu\text{m}$  衍射光栅,如图 6(b) 所示。从图中可以观察到,在玻璃内部的刻线均匀,边缘清晰,加工质量较高。

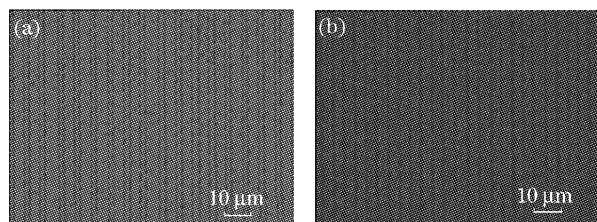


图6 飞秒激光在玻璃材料上制备的光栅结构  
(a) ZK6 玻璃; (b) LaF<sub>2</sub> 玻璃

Fig. 6 Grating structures fabricated in ZK6 glass (a) and LaF<sub>2</sub> glass (b) with fs laser

## 6 结 论

采用脉冲宽度 150 fs, 波长 800 nm, 脉冲重复率 1 kHz, 最大单脉冲能量  $50 \mu\text{J}$  的飞秒脉冲激光开展了飞秒激光微加工技术研究。当峰值功率密度和平均功率密度分别为  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  和  $1.2 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$  时,在镀金薄膜和镀银薄膜上加工了  $4 \times 4$  的点阵孔,点阵的加工尺度分别为  $1 \mu\text{m}$  和  $1.5 \mu\text{m}$ ,接近了 800 nm 波长的衍射极限。当加工速度为  $40 \mu\text{m/s}$ ,激光峰值功率密度分别为  $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  和  $8.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  时,在半导体 GaAs 材料上加工了尺度为  $3.5 \mu\text{m}$  的  $4 \times 4$  阵列孔以及宽度为  $4 \mu\text{m}$  刻线。在激光的峰值功率密度和平均功

率密度分别为  $2.7 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  和  $4.1 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$  以及加工速度达到  $400 \mu\text{m/s}$  情况下,在  $\text{LaF}_2$  玻璃上制备了光栅常量为  $5 \mu\text{m}$  衍射光栅,并且在 ZK6 玻璃上制备了光栅常量为  $2.5 \mu\text{m}$  和  $5 \mu\text{m}$  的双周期衍射光栅。

### 参 考 文 献

- 1 J. Békési, J.-H. Klein-Wiele, P. Simon. Efficient submicron processing of metals with femtosecond UV pulses [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **76**(3): 355~357
- 2 J.-H. Klein-Wiele, J. Bekesi, P. Simon. Sub-micron patterning of solid materials with ultraviolet femtosecond pulses [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **79**(4~6): 775~778
- 3 W. L. Liang, B. K. A. Ngoi, L. E. N. Lim *et al.*. Micromachining of circular ring microstructure by femtosecond laser pulses [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(4): 285~290
- 4 X. C. Wang, G. C. Lim, H. Y. Zheng *et al.*. Femtosecond pulse laser ablation of sapphire in ambient air [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, **228**(1~4): 221~226
- 5 Gabriel Dumitru, Valerio Romano, Heinz P. Weber *et al.*. Ablation of carbide materials with femtosecond pulses [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2003, **205**(1~4): 80~85
- 6 Lawrence Shah, Jesse Tawney, Martin Richardson *et al.*. Femtosecond laser deep hole drilling of silicate glasses in air [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2001, **183**(3~4): 151~164
- 7 Frank Roeske, Jerry Benterou, Ronald Lee *et al.*. Cutting and machining energetic materials with a femtosecond laser [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, **28**(2): 53~57
- 8 C. Momma, S. Nolte, B. N. Chichkov *et al.*. Precise laser ablation with ultrashort pulses [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1997, **109/110**: 15~19
- 9 Liu Qing, Cheng Guanghua, Wang Qishan *et al.*. Fabrication of internal diffraction gratings in transparent materials using femtosecond laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1290~1293
- 刘 青,程光华,王屹山等. 用飞秒激光在透明介质体内形成衍射光栅 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1290~1293
- 10 Liang Jianguo, Wang Chingyue, Ni Xiaochang *et al.*. The study on machining microstructure grating at the surface of organic material with nanojoule femtosecond laser [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(4): 274~277
- 梁建国,王清月,倪晓昌等. 纳焦飞秒激光在有机材料表面刻划微结构光栅的研究 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2004, **2**(4): 274~277