

文章编号: 0258-7025(2008)05-0768-04

偏振光飞秒双脉冲微加工

韩泽华^{1,2} 周常河¹ 戴恩文¹ 谢 金^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 利用具有纳焦能量、高重复频率的偏振光飞秒双脉冲对金属铬膜样品进行微加工, 样品表面都会产生微突起状结构, 它们的宽度在 0~400 ps 的双脉冲时延范围内没有明显的变化, 但高度却都在 1~10 ps 的双脉冲时延范围内呈现明显的下降, 在此时延范围之外并没有明显的变化。通过加工样品的扫描电子显微镜 (SEM) 图片发现, 对于偏振光, 利用双脉冲方法, 可以获得更好的加工质量。并且线偏振光得到的微突起状结构比较细长, 在入射光束的偏振方向上有所伸长; 圆偏振光得到的微突起状结构比较接近圆形。即在低脉冲能量、高重复频率情况下, 具体的微加工特征形貌与入射光束的偏振状态有关。

关键词 激光技术; 飞秒激光微加工; 金属薄膜; 偏振双脉冲; 微突起

中图分类号 TN 249; TG 665 **文献标识码** A

Micromaching with Polarized Light Femtosecond Double Pulses

Han Zehua^{1,2} Zhou Changhe¹ Dai Enwen¹ Xie Jin^{1,2}

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Microbump structures were formed on the sample surface after micromachining the Cr films by polarized femtosecond double pulses with nanojoule energy and high repetition rate. Although the widths of the microbumps have no obvious variation among the 0~400 ps double pulses delay, the heights of them exhibit an obvious drop among the 1~10 ps double pulses delay and have no obvious variation beyond this delay. It is helpful to understand the electron - phonon coupling process in metal film during femtosecond laser micromaching. Furthermore, better micromaching quality was acquired with double pulses method for both linearly and circularly polarized light according to the scanning electronic microscope (SEM) images. Contrast to nearly circular microbumps fabricated by circularly polarized light, the microbumps fabricated by linearly polarized light is narrow and stretched in the direction of polarization of the incident beam. Namely, the micromaching feature is related to the polarized state of the incident beam with low pulse energy and high repetition rate.

Key words laser technique; femtosecond laser micromaching; metal film; polarized double pulses; microbumps

1 引言

飞秒脉冲激光在材料精细加工中变得越来越有吸引力, 尤其是在微加工、微光学和微电子学领域中^[1~3]。相对长脉冲激光, 飞秒脉冲激光的优势为在脉冲持续的很短时间内电子来不及向周围的晶格传递能量, 从而积聚极高的能量, 最终导致高度局域化激光破坏^[4]。利用飞秒脉冲激光进行微加工有热

损害小、移除效率高、可加工各种材料以及精确控制加工尺寸等诸多独特优点。目前, 国内外很多课题组已开展飞秒脉冲激光微加工的研究^[5~9], 但大多数都是采用具有放大系统 (CPA) 的飞秒激光器来进行实验研究。本文直接采用飞秒激光振荡器对金属薄膜进行微加工, 在这种具有纳焦能量、高重复频率的偏振光飞秒双脉冲作用下, 金属薄膜表面产生了

收稿日期: 2007-10-17; 收到修改稿日期: 2007-11-09

基金项目: 国家 973 计划 (2006CB806000) 和上海市科技委员会 (06SP07003, 0652nm005) 资助项目。

作者简介: 韩泽华 (1981—), 男, 河南人, 博士研究生, 主要从事飞秒信息处理技术方面的研究。

E-mail: zehuahan@siom.ac.cn

导师简介: 周常河 (1965—), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 目前主要从事衍射光学、微光学和飞秒信息处理技术方面的研究。E-mail: chazhou@mail.shcnc.ac.cn

不同于具有放大器系统的飞秒激光微加工时的微突起结构。样品微加工后的表面轮廓与形貌通过台阶仪和扫描电子显微镜(SEM)进行了分析研究,并对比了线偏阵和圆偏阵两种偏阵状态,不同的双脉冲时间延迟下的实验结果。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验中采用美国相干公司的 76 MHz Ti:sapphire 飞秒激光振荡器,产生中心波长 800 nm,脉冲宽度 90 fs,脉冲能量 1.3 nJ(相应于激光功率 100 mW 时)的飞秒脉冲,脉冲的参数由实验室自制的达曼 FROG 装置测得^[10]。一个迈克耳孙干涉仪用作双脉冲发生器,其中一个角反射镜装在可移动臂上,在 0~75 mm 范围内移动时可产生 0~500 ps 的时间延迟。双脉冲的光谱通过光谱仪监测,中性衰减器用来控制飞秒脉冲的能量。插入的 1/4 波片用来将线偏振的飞秒脉冲激光转换为圆偏振光,然后再经过数值孔径(NA)0.25 的显微物镜聚焦,使光束垂直入射到样品表面。CCD 用来监控样品表面位置,以保证样品在同样的聚焦条件下进行加工。实验所用样品为玻璃衬底上的 145 nm 厚金属铬膜,样品固定在具有 30 nm 精度的三维移动台上,平台由计算机通过运动控制卡 PCI-7344(NI, Inc.)和伺服放大系统(NAI, Inc.)进行控制。

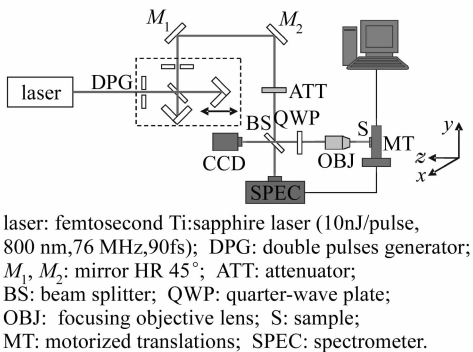


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果和讨论

微加工实验是在室温和空气环境中进行的。样品表面依次用乙醇和丙酮清洗,加工后的表面轮廓和形貌分别用 Taylor Hobson 台阶仪和扫描电子显微镜测得。在激光功率为 40 mW,加工速度为 $18 \mu\text{m/s}$ 时,分别由线偏振和圆偏振飞秒双脉冲得到的微突起结构的高度和宽度随双脉冲时延的变

化关系如图 2,图 3 所示。图中的每个点都对应 60 个实验数据的平均,图 2 中微突起状结构高度和宽度的标准方差分别约为 10% 和 6%;图 3 中微突起状结构的高度和宽度的标准方差分别约为 9.2% 和 5.6%。从图 2 和图 3 中可以看出,对于这两种偏振光,微突起状结构的宽度在 0~400 ps 的范围内都没有明显的变化,只是有轻微的起伏,但微突起状结构的高度在 1~10 ps 范围内都呈现明显的下降,而在此时延范围以外却没有明显的变化。对于通常的金属,其中电子和声子的耦合时间是在数百飞秒到几皮秒之间^[11],这说明金属中电子和声子的相互耦合对其表面微突起状结构的产生起到了重要作用。而入射光束的偏振状态对微突起状结构的产生与否并

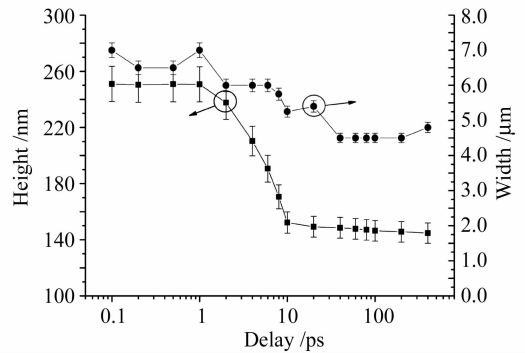


图 2 激光功率 40 mW,加工速度 $18 \mu\text{m/s}$ 时,线偏振飞秒双脉冲微加工得到的微突起状结构的高度和宽度随双脉冲时延的变化关系

Fig. 2 Heights and widths of the microbumps fabricated by 40 mW linearly polarized femtosecond double pulses at the speed of $18 \mu\text{m/s}$ as a function of delay between double pulses

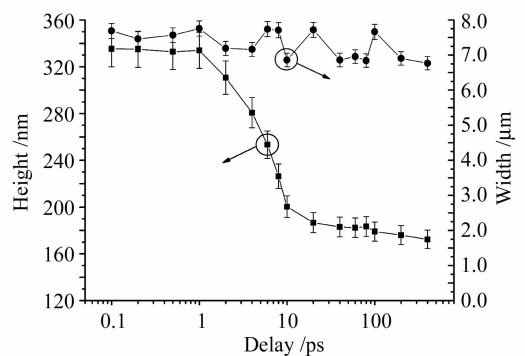


图 3 激光功率 40 mW,加工速度 $18 \mu\text{m/s}$ 时,圆偏振飞秒双脉冲微加工得到的微突起状结构的高度和宽度随双脉冲时延的变化关系

Fig. 3 Heights and widths of the microbumps fabricated by 40 mW circularly polarized femtosecond double pulses at the speed of $18 \mu\text{m/s}$ as a function of delay between double pulses

没有太大影响,实验结果有助于理解飞秒微加工金属时电子和声子的相互耦合过程。另外,从图 2 和图 3 中还可以看出,在同一双脉冲时延下,圆偏振飞秒双脉冲得到的微突起状结构的高度要比线偏振光得到的高几十纳米,宽度也要宽 $1\ \mu\text{m}$ 左右。这是由于在通过光束移动进行微加工的情况下,材料对不同偏振状态的光会表现出不同的加工阈值,其中采用 s-偏振光时加工阈值最大,圆偏振光次之,p-偏振光加工时阈值最小^[12]。这里,图 2 中采用的线偏振光属于 s-偏振光加工的情况,因而所获得的微突起状结构的尺寸相比圆偏振光的情况要小一些。

图 4 和 5 给出在激光功率为 $40\ \text{mW}$,加工速度为 $18\ \mu\text{m}/\text{s}$ 时,分别由线偏振和圆偏振飞秒双脉冲加工样品得到的表面形貌图。通过这些扫描电子显微镜图片可以清晰地看到,样品表面均呈现出明显的微突起状结构。而且,对于线偏振和圆偏振这两种偏振光,利用双脉冲方法,都可以获得更好的加工质量。并且,线偏振光得到的微突起状结构比较细长,在入射光束的偏振方向上有所伸长,如图 4(a) 和(b)所示。而圆偏振光得到的微突起状结构就比

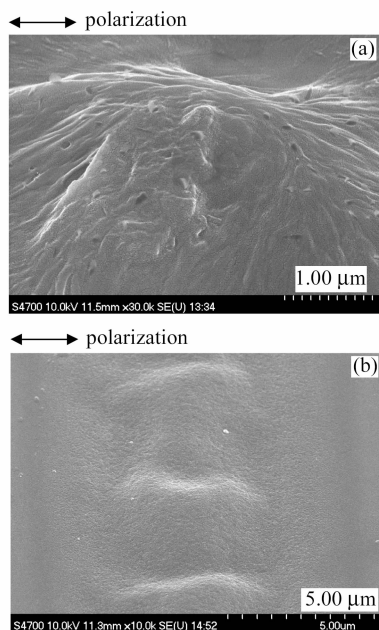


图 4 激光功率 $40\ \text{mW}$,加工速度 $18\ \mu\text{m}/\text{s}$ 时,线偏振飞秒双脉冲在(a) $0\ \text{ps}$ 和(b) $0.2\ \text{ps}$ 时延下得到的微突起状结构的扫描电子显微镜图片(箭头为入射光束偏振方向)

Fig. 4 SEM images of the microbumps fabricated by $40\ \text{mW}$ linearly polarized femtosecond double pulses at the speed of $18\ \mu\text{m}/\text{s}$ in delays of (a) $0\ \text{ps}$, (b) $0.2\ \text{ps}$ (arrows showing the polarization of the incident beam)

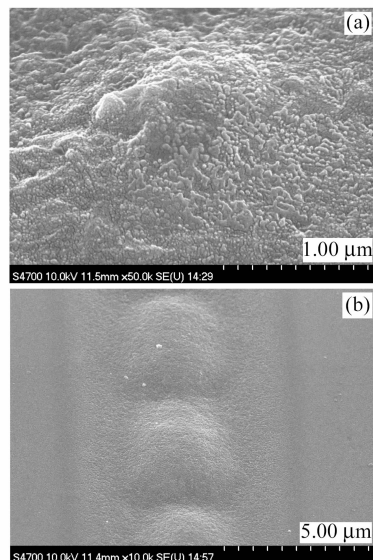


图 5 激光功率 $40\ \text{mW}$,加工速度 $18\ \mu\text{m}/\text{s}$ 时,圆偏振飞秒双脉冲在(a) $0\ \text{ps}$ 和(b) $0.2\ \text{ps}$ 时延下得到的微突起状结构的扫描电子显微镜图片

Fig. 5 SEM images of the microbumps fabricated by $40\ \text{mW}$ circularly polarized femtosecond double pulses at the speed of $18\ \mu\text{m}/\text{s}$ in delays of (a) $0\ \text{ps}$, (b) $0.2\ \text{ps}$

较接近圆形,如图 5(a) 和(b)所示。这是因为在低脉冲能量的情况下,只有光束的中心部分有足够的能量可以对材料进行微加工,这时光束的偏振情况就对所加工的形貌起到了重要作用。由此看来,在低脉冲能量、高重复频率的情况下,具体的微加工特征形貌与入射光束的偏振状态有关,采用圆偏振光来进行微加工就可以获得圆形的加工形貌,但这时应特别注意 $1/4$ 波片的快(慢)轴的方位,与入射线偏振光束偏振方向的夹角稍微偏离 45° 就会将其转换为椭圆偏振光,而非理想的圆偏振光,这可以通过在 $1/4$ 波片后面放置偏振片,旋转偏振片,检测偏振片之后的光功率是否改变来判断波片所转换的光是否为圆偏振光。此外,还有两种方法可以获得圆形的加工形貌,一种是采用偏振钻孔法,即把 $1/2$ 波片放在一个电控转动台上,通过波片的旋转来改变相邻两飞秒脉冲的偏振状态^[13];另一种就是采用具有柱对称性的径向或角向偏振光来进行微加工,这种方法相比圆偏振光有更好的加工质量、加工效率以及更小的加工分辨率^[14]。

4 结 论

利用具有纳焦能量、高重复频率偏振光飞秒双脉冲对金属铬膜样品进行了微加工实验研究,样品

表面都会产生微突起状结构, 它们的宽度在 0~400 ps 的双脉冲时延范围内虽然没有明显的变化, 但它们的高度却都在 1~10 ps 的双脉冲时延范围内呈现明显的下降, 而在此时延范围之外并没有明显的变化。这表明金属中电子和声子的相互耦合对其表面微突起状结构的产生起到了重要作用, 而入射光束的偏振状态对微突起状结构的产生与否并无太大影响, 这有助于理解飞秒激光脉冲微加工金属时电子和声子的相互耦合过程。此外, 通过所加工样品的扫描电子显微镜图片还发现, 对于线偏振和圆偏振这两种偏振光, 利用双脉冲方法, 都可以获得更好的加工质量。并且, 线偏振光得到的微突起状结构比较细长, 在入射光束的偏振方向上有所伸长; 而圆偏振光得到的微突起状结构就比较接近圆形。即在低脉冲能量、高重复频率的情况下, 具体的微加工特征形貌与入射光束的偏振状态有关, 这一实验结果有利于飞秒激光脉冲微加工技术的应用研究。

参 考 文 献

- 1 Y. Zhou, M. H. Hong, J. Y. H. Fuh *et al.*. Nanopatterning mask fabrication by femtosecond laser irradiation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **192-193**:212~217
- 2 Pornsak Srisungsitthisunti, Okan K. Ersoy, Xianfan Xu. Laser direct writing of volume modified Fresnel zone plates [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(9):2090~2096
- 3 T. H. R. Crawford, A. Borowiec, H. K. Haugen. Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800 nm pulses [J]. *Appl. Phys. A*, 2005, **80**:1717~1724
- 4 D. Homoelle, S. Wielandy, Alexander L. Gaeta. Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(18):1311~1313
- 5 Han Zehua, Zhou Changhe, Dai Enwen. Microripple structures induced by femtosecond laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):715~718
韩泽华, 周常河, 戴恩文. 飞秒激光诱导波纹状微突起结构[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):715~718
- 6 K. Venkatakrisnan, 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**:143~146
- 7 Jonathan B. Ashcom, Rafael R. Gattass, Chris B. Schaffer. Numerical aperture dependence of damage and supercontinuum generation from femtosecond laser pulses in bulk fused silica [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(11):2317~2322
- 8 Ihtesham H. Chowdhury, Xianfan Xu, Andrew M. Weiner. Ultrafast double-pulse ablation of fused silica [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(15):151110
- 9 M. Ams, G. D. Marshall, M. J. Withford. Study of the influence of femtosecond laser polarisation on direct writing of waveguides [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(26):13158~13163
- 10 Enwen Dai, Changhe Zhou, Guowei Li. Dammann SHG-FROG for characterization of the ultrashort optical pulses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16):6145~6152
- 11 V. Schmidt, W. Husinsky, G. Betz. Ultrashort laser ablation of metals: pump-probe experiments, the role of ballistic electrons and the two-temperature model [J]. *Applied Surface Science*, 2002, **197-198**:145~155
- 12 K. Venkatakrisnan, B. Tan, P. Stanley *et al.*. The effect of polarization on ultrashort pulsed laser ablation of thin metal films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(3):1604~1607
- 13 S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage *et al.*. Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling [J]. *Appl. Phys. A*, 1999, **68**:563~567
- 14 Krishnan Venkatakrisnan, Bo Tan. Interconnect microvia drilling with a radially polarized laser beam [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2006, **16**:2603~2607