

文章编号: 0258-7025(2008)07-1078-05

基于光子晶体光纤飞秒激光放大器的微纳加工系统

巫殷忠 刘博文 宋有建 胡明列 贾 威 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 以掺镱大模面积光子晶体光纤(PCF)飞秒激光放大器为光源组建了一套结构紧凑且运行稳定的飞秒激光微纳加工系统,中心波长为 1040 nm,重复频率 50 MHz,最大平均功率 16 W,光栅压缩后脉冲宽度 85 fs。利用该套系统在硅片、金属薄膜(Cr 膜、Al 膜)上演示了微图案的刻划,并与采用重复频率 1 kHz 的固体钛宝石飞秒激光放大器的加工结果进行对比,发现利用新组建的加工系统进行微纳加工,由于单脉冲能量较小且便于调节,使得刻划微图案时边缘加工效果更容易控制,且避免了加工过程中未加工区域受到的污染,保护了制作衬底。显示了该套系统高重复频率和高平均功率的特性及其在改善微纳加工效果及明显提高加工效率方面的优势。

关键词 激光技术;飞秒激光微纳加工;微图案刻划;光子晶体光纤飞秒激光放大器;高重复频率;高平均功率

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083507.1078

Micromachining System Based on Photonic Crystal Fiber Femtosecond Laser Amplifier

Wu Yinzong Liu Bowen Song Youjian Hu Minglie Jia Wei Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, School of Precise Instruments and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Tianjin University, 300072 Tianjin, China)

Abstract A compact and stable femtosecond laser micromachining system was founded based on Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber (PCF) femtosecond laser amplifier, which outputs pulse with 1040 nm center wavelength, 50 MHz repetition rate, 100 fs pulse width, 16 W maximal average power and 85 fs pulse duration after compressed by grating. Fabrication of micropatterns on silicon and metallic thin film (Cr, Al) was demonstrated by the system and the obtained micropatterns were compared with those fabricated by solid-state Ti:sapphire femtosecond laser amplifier with 1 kHz repetition rate. It shows that due to the lower and easily adjusted single pulse energy of our high repetition rate femtosecond laser, the proposed system can effectively control the morphologies of micropatterns, and avoid contamination during micromachining, herein, protect the substrates. The characteristics of high repetition rate and high average power for the founded system are revealed to be advantageous for femtosecond micromachining in aspects of improving the fabrication outcome and promoting the efficiency.

Key words laser technique; femtosecond laser micromachining; micropattern fabrication; photonic crystal fiber laser amplifier; high repetition rate; high average power

1 引言

飞秒激光作为一种新的微纳加工手段,它极高的峰值功率和极短的脉冲持续时间使其与材料作用的机理与传统长脉冲激光不同。飞秒激光被物镜聚

焦在微米尺寸的焦点区域内具有极高的能流密度,与材料相互作用时在焦点区域产生多光子吸收,通过多光子电离和雪崩电离在加工区域瞬间产生高温高密度等离子体,导致材料直接气化或发生改性,最

收稿日期: 2008-06-04; 收到修改稿日期: 2008-06-25

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314904, 2006CB806002)、国家 863 计划(2007AA03Z447)、国家自然科学基金(60678012)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073)、教育部科学技术研究重点项目(108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 巫殷忠(1980—),男,博士研究生,主要从事飞秒激光微纳加工方面的研究。E-mail: yinzhongwu2008@163.com

导师简介: 王清月(1938—),男,教授,博士生导师,主要从事飞秒激光的产生、传输、放大及其应用等方面的研究。

E-mail: chywang@tju.edu.cn (通信联系人)

终在细小的加工区域内产生材料去除、折射率改变及选择性腐蚀等现象(取决于入射激光参数、加工方式和材料种类等),达到微纳加工的目的^[1~8]。飞秒激光极短的脉冲持续时间大大减小了其在加工材料时的热效应,保证了良好的加工形貌。与材料作用时在焦点区域产生的多光子吸收效应,缩小了加工尺寸,提高了加工的空间精度,甚至可突破入射激光的衍射极限。另外,焦点处的非线性吸收使入射飞秒激光可聚焦在透明材料内部任意位置,达到三维微纳加工的目的^[4,5,9]。

由于飞秒激光的独特加工优势,人们利用它加工了高熔点金属、透明电介质、半导体、易爆物、聚合物、陶瓷及活生物组织等广泛的材料,并将它应用于微光学、微电子学、微机械器件及生物化学微分析系统的直接制作,简化了制作工艺、节省了成本和时间^[10~14]。

尽管如此,飞秒激光微纳加工在加工效率和加工光源系统等方面仍有待改进。目前飞秒激光微纳加工应用中采用的激光系统主要是千赫兹重复频率的固体飞秒激光放大器,它的低重复频率限制了加

工效率的提高,固体放大器也使整个加工系统变得复杂且成本昂贵。因此,有必要研制新一代的飞秒激光技术,以提高工作效率、改善加工精度、简化系统结构、降低工作成本。本文研制了基于光子晶体光纤(PCF)飞秒激光放大器的高重复频率高平均功率微纳加工系统,并利用它在硅片和金属薄膜(Cr膜、Al膜)上制作了微图案。

2 光子晶体光纤飞秒激光微纳加工系统

图 1 为研制的高重复频率高平均功率光子晶体光纤飞秒激光微纳加工系统,它由飞秒激光光源模块和微纳加工模块组成。飞秒激光光源模块为实验室自行研制的掺镱(Yb)双包层保偏大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大系统,它由振荡级和放大级两部分组成,采用波长 976 nm 的大功率激光二极管(LD)抽运,无需水冷,可直接裸露在空气中自然冷却。放大级直接输出的平均功率为 16 W,中心波长 1040 nm,重复频率 50 MHz,脉冲宽度 2.9 ps,光栅对压缩后脉冲宽度为 85 fs^[15,16]。

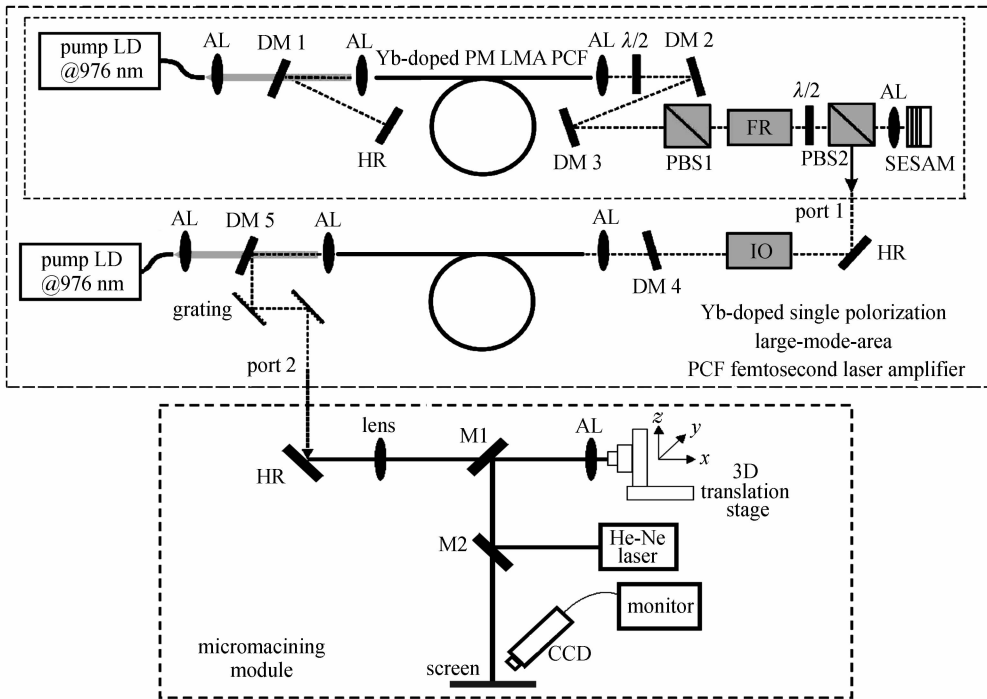


图 1 高重复频率、高平均功率光子晶体光纤飞秒激光微纳加工系统示意图

Fig. 1 Schematic of high repetition rate and high average power PCF femtosecond laser micromachining system

微纳加工模块主要包含样品前的聚焦物镜、计算机控制的三维微位移平台及辅助的定位监视系统。采用单片非球面透镜作为聚焦物镜,将入射的飞秒激光聚焦在样品上,可以根据实验需要方便地

更换。实验中选用的非球面透镜的数值孔径为 0.68,工作距离为 1.76 mm(LightPath 350330-B)。加工过程中通过计算机控制步进电机,使其驱动载着样品的微位移平台作预定的三维运动,从而使激

光焦点在样品上按预定轨迹扫描,制作所需图案。定位监视系统将入射飞秒激光的焦点定位在样品表面并同步监视加工区域产生的现象。实验中采用氦氛激光同轴监视。

3 微图案的直接刻划

使用研制的高重复频率飞秒激光微纳加工系统在抛光的硅片和金属薄膜表面演示了微图案的直接刻划,并用光学显微镜(Hirox Inc.)分析了刻划的微图案。

图2和图3为使用该加工系统在硅片表面直接刻划的线阵和 90° 扇形微图案。图4为使用1 kHz重复频率的钛宝石飞秒激光放大器,以稍高于破坏阈值的平均功率入射,在FOTURAN玻璃(Schott

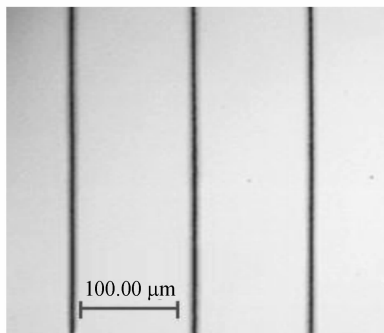


图2 高重复频率光子晶体光纤飞秒激光以平均功率1100 mW入射、速度 $70 \mu\text{m/s}$ 扫描,在硅片表面刻划的线阵的光学显微镜图

Fig.2 Optical micrograph of line array micropattern fabricated on silicon by the high repetition rate PCF femtosecond laser, with incident average power of 1100 mW and scanning velocity of $70 \mu\text{m/s}$

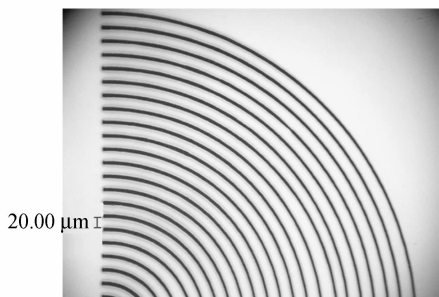


图3 高重复频率光子晶体光纤飞秒激光以平均功率450 mW入射、速度 $90 \mu\text{m/s}$ 扫描,在硅片表面刻划的 90° 扇形图案的光学显微镜观察图

Fig.3 Optical micrograph of sector (90°) micropattern fabricated on silicon by high repetition rate PCF femtosecond laser, with incident average power of 450 mW and scanning velocity of $90 \mu\text{m/s}$

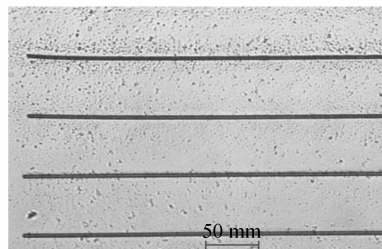


图4 1 kHz重复频率的钛宝石飞秒激光放大器以平均功率1.2 mW入射,在FOTURAN玻璃表面刻划的线阵的光学显微镜透射式观察图

Fig.4 Optical transmitted micrograph of line array micropattern fabricated on FOTURAN by 1 kHz repetition rate Ti: Sapphire femtosecond laser amplifier, with incident average power of 1.2 mW. FOTURAN is a type of photosensitive glass produced by Schott Glass Company. Comparison of two femtosecond laser processing systems, it can be found that the processing system used for micro-pattern processing has neat line edges and effectively reduces the pollution of debris to the sample, thus protecting the substrate.

采用与刻划硅片时相同的物镜将飞秒激光聚焦在熔融石英内部扫描,发现焦点可以在熔融石英内部诱导成丝,但由于熔融石英的飞秒激光破坏阈值比硅片高约一个数量级,且选用的聚焦物镜的数值孔径不是特别高,因而必须以比刻划硅片大得多的平均功率入射才能在熔融石英内部诱导结构破坏。研究表明,利用脉冲能量较小(微焦耳以下)的近红外飞秒激光对熔融石英等具有高破坏阈值的透明介电材料进行微纳加工时,一般应采用数值孔径较高

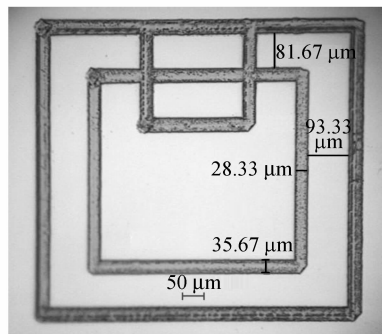


图5 高重复频率光子晶体光纤飞秒激光在Cr膜(厚度50 nm)上刻划的方形微图案的光学显微镜观察图。入射激光的平均功率为1350 mW,扫描速度为 $90 \mu\text{m/s}$

Fig.5 Optical micrograph of quadrate micropattern fabricated on Cr film (50 nm thick) by high repetition rate PCF femtosecond laser, with incident average power of 1350 mW and scanning velocity of $90 \mu\text{m/s}$

的聚焦物镜(如油浸物镜),将入射激光聚焦在样品上很小的焦点内,才容易诱导材料的结构变化。实验中为了保证一定的工作距离,未选用油浸物镜,而选用数值孔径为 0.68 的非球面透镜作为聚焦物镜。

图 5 和图 6 分别为使用研制的加工系统在金属铬(Cr)膜上刻划的方形微图案和铝(Al)膜上刻划的线阵微图案的光学显微镜和扫描电子显微镜(SEM)观察结果。从图中可见,与加工硅片的情形类似,由于入射飞秒激光的单脉冲能量很小,有效地避免了加工时材料溅射对薄膜表面的污染,薄膜未加工区保持其原来的完整洁净状态。

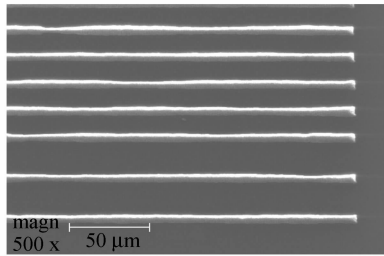


图 6 高重复频率光子晶体光纤飞秒激光在 Al 膜(厚度 100 nm)上刻划的线阵微图案的 SEM 分析图。入射激光的平均功率为 340 mW,扫描速度为 $120 \mu\text{m/s}$

Fig. 6 SEM micrograph of line array micropattern fabricated on Al film (100 nm thick) by high repetition rate PCF femtosecond laser, with incident average power of 340 mW and scanning velocity of $120 \mu\text{m/s}$

4 分析与讨论

本文研制的高重复频率的光子晶体光纤飞秒激光放大器输出的单脉冲能量范围为数十纳焦耳至数百纳焦耳量级,比固体飞秒激光放大器的微焦耳甚至毫焦耳脉冲能量低两到三个量级,因此当较低脉冲能量的单个飞秒脉冲作用于材料时,产生的热量要比固体飞秒激光放大器的单脉冲产生的热量少得多,从而大大减弱加工区域的材料溅射等不良影响。通过控制加工区域的曝光时间(即入射脉冲数),可以精确控制加工区域内沉积的能量,从而更准确地控制加工形貌,达到良好的加工效果,特别适合应用于需要以小能量入射进行局部精细修补或微调的场合,如生物组织的加工、电阻电容元件的微调、微电子工艺中掩模板的修复等应用。

通常固体飞秒激光放大器输出的单脉冲能量为几纳焦耳,将它用于材料的微纳加工时,需要采用很高数值孔径的物镜聚焦至足够的强度以产生非线性

作用,这使物镜的工作距离很短,带来加工上的不便^[17]。即便如此,固体飞秒激光放大器在加工一些破坏阈值较高的材料时仍显得捉襟见肘。本文研制的微纳加工系统由于具有光子晶体光纤放大级,在高重复频率(数十兆赫兹)情况下,单脉冲能量达到数十至几百纳焦耳,扩展了它在材料微纳加工方面的能力。

目前,用主流的固体飞秒激光放大器进行微纳加工存在着效率不高的突出问题,其典型的加工速度为几十微米每秒,在加工面积较大的微图案或微结构时非常耗时,因此提高其加工效率就显得很有必要,而采用高重复频率的飞秒激光是解决该问题的有效手段。微纳加工系统基于高重复频率(50 MHz)的飞秒激光,在相同的时间内,它输出的脉冲数目比典型的 1 kHz 重复频率的固体飞秒激光放大器高 4 个量级,因而在加工相同的材料时,根据相同的加工区域必须沉积相同的脉冲数估算,利用高重复频率飞秒激光进行微纳加工时,其速度比固体飞秒激光放大器至少高 3 个量级,加工速度可达几十毫米每秒,大大提高加工效率,节省了加工耗时。

虽然高的脉冲重复频率可以带来加工效率上的优势,但脉冲重复频率并非越高越好。由于飞秒激光脉冲与透明材料相互作用时热扩散时间为微秒量级,因而若飞秒脉冲重复频率太高,使得脉冲间隔时间短于材料的热扩散时间,将导致加工区域的热累积效应,影响加工效果。综合考虑飞秒激光的加工效率和热量的扩散,合适的飞秒激光脉冲重复频率应该选取在几百千赫兹至几兆赫兹,使得脉冲时间间隔与热扩散时间为相同量级。目前,我们正在进行利用声光调制器的方法将重复频率降到 1 MHz 以下的实验。

利用光子晶体光纤飞秒激光放大器组建微纳加工系统,省去了复杂的固体飞秒激光放大器环节,简化了整个加工系统,使其结构更加紧凑,并节省成本。另外,光子晶体光纤飞秒激光器无需水冷,预热时间短,具有良好的环境稳定性,操作与维护都很方便。

5 结论

采用掺 Yb 大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器组建了一套结构紧凑、运行稳定、操作方便的微纳加工系统,使用它在硅片、金属薄膜上制作微图案,实验表明,该套系统可以达到良好的加工效果。另外,由于该套加工系统具有高平均功率和高重复频率的特点,使其在扩展加工材料的能力和提

纳加工效率方面也很有优势,为飞秒激光在微纳加工中的应用提供了更广阔的空间。

参 考 文 献

- 1 B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman *et al.*. Optical ablation by high-power short-pulse lasers[J]. *J. Optical Society of America B*, 1996, **13**(2):459~468
- 2 X. Liu, D. Du, G. Mourou. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10):1706~1716
- 3 K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21):1729~1731
- 4 E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang *et al.*. Three-dimensional optical storage inside transparent materials[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):2023~2025
- 5 A. Marcinkevicius, S. Juodkakis, M. Watanabe *et al.*. Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(5):277~279
- 6 C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova *et al.*. Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2006, **84**(1~2):47~61
- 7 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5):595~622
何 飞,程 亚. 飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):595~622
- 8 Yinzhong Wu, Ching-yue Wang, Wei Jia *et al.*. Influence of scanning velocity on femtosecond laser direct writing lines on FOTURAN glass[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1):51~53
- 9 A. M. Kowalevich, V. Sharma, E. P. Ippen *et al.*. Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9):1060~1062
- 10 Z. Wang, K. Sugioka, Y. Hanada *et al.*. Optical waveguide fabrication and integration with a micro-mirror inside photosensitive glass by femtosecond laser direct writing[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2007, **88**(4):699~704
- 11 S. Taccheo, G. D. Valle, R. Osellame *et al.*. Er: Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22):2626~2628
- 12 S. J. Mihailov, C. W. Smelser, P. Lu *et al.*. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12):995~997
- 13 K. Sugioka, C. Ya, K. Midorikawa *et al.*. Three-dimensional micromachining of glass using femtosecond laser for lab-on-a-chip device manufacture[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2005, **81**(1):1~10
- 14 N. Takeshima, Y. Narita, T. Nagata *et al.*. Fabrication of photonic crystals in ZnS-doped glass[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5):537~539
- 15 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(6):811~814
刘博文,胡明列,宋有建等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光放大系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):811~814
- 16 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large mode area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12):1603~1606
王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1603~1606
- 17 K. Minoshima, A. W. Kowalevich, I. Hartl *et al.*. Photonic device fabrication in glass by use of nonlinear materials processing with a femtosecond laser oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(19):1516~1518