

PZT 压电厚膜的飞秒激光烧蚀及图形化研究

刘爽¹, 褚家如¹, 黄文浩¹, 李保家²

(1. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230027;

2. 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要:利用飞秒激光实现了对 PZT 厚膜(十几至上百微米)材料的精确烧蚀和图形化研究. 飞秒激光脉宽为 130fs, 重复频率为 1 kHz. 首先利用飞秒激光脉冲能量与烧蚀点大小的关系, 得到飞秒激光烧蚀 PZT 厚膜的能量阈值为 100 J/cm^2 , 然后利用功率为 50~300 mW 的飞秒激光对 PZT 压电厚膜进行烧蚀和图形化研究. 结合飞秒激光加工的无热影响和无掩膜等特性, 在一定的扫描控制下, 可以实现对 PZT 厚膜高精度和高效率的加工. 最后, 在功率为 300 mW、扫描速率为 5 mm/s 条件下实现了对 PZT 厚膜驱动器的图形化. 经测试表明, 图形化以后, PZT 驱动器驱动性能有明显(30%)地提高.

关键词:飞秒激光; PZT; 图形化; 驱动器

中图分类号: TN16 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.10.004

Ablation and micromachining of PZT thick films using femtosecond laser

LIU Shuang¹, CHU Jiaru¹, HUANG Wenhao¹, LI Baojia²

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Femtosecond laser was used for the ablation and patterning of PZT thick films. The pulse width of the laser was 130 fs, and the repetition rate was 1 kHz. First, based on the relationship between the diameter of the ablated crater and the applied peak fluence, the ablation threshold fluence 100 J/cm^2 for PZT was estimated by determining the magnitude of the peak fluence for zero ablated spot diameter (no damage); then, 50 to 300 mW femtosecond laser was used to pattern the PZT thick film actuator accurately and efficiently, the process of which had no heat affected zones and did not need a mask. Under the feed rate of 5 mm/s, the PZT thick film actuator was patterned. The driving ability of the actuator is enhanced by 30% after patterning.

Key words: femtosecond laser; PZT; pattern; actuator

0 引言

PZT 铁电陶瓷是 MEMS 中最为常用的功能材料之一,它不仅可以作为高性能的驱动材料来制作微型致动器,也可以作为高灵敏度的传感材料制作微型传感器。目前,高性能的 PZT 铁电材料的制备、PZT 铁电薄膜底电极材料的选择以及 PZT 陶瓷的高精度图形化技术等一直都是 PZT 陶瓷材料研究过程中的热点问题^[1]。

微图形化是 PZT 陶瓷应用的关键技术之一。对于 PZT 压电薄膜(1 μm 左右),常用的图形化方法包括湿法化学刻蚀和干法刻蚀(如 RIE 反应离子刻蚀、IBE 离子束刻蚀和 ECR 等离子刻蚀等)^[2-7]。干法刻蚀 PZT 薄膜具有图形转化精度高和极好的各向异性等特点,但所需设备昂贵、刻蚀速率低、对底电极 Pt 的选择性差,且易导致光刻胶掩膜的炭化而难以去除。湿法刻蚀是一种成本低、刻蚀速率快的 PZT 薄膜图形化方法,但图形转换精度较差,

难以用于对精度要求高的微电子领域。但是对于 PZT 压电陶瓷厚膜(十微米至几十微米范围)来讲,以上方法目前还不能满足 PZT 厚膜的高精度图形化要求^[8-9]。反应离子刻蚀等干法刻蚀技术由于其刻蚀速率较低、掩膜制作困难等因素,一般不能用于 PZT 厚膜的图形化刻蚀技术;而化学湿法刻蚀方法由于刻蚀过程中侧蚀较大、图形化精度较差、难以找到合适的掩膜等因素,目前也不能用于精度要求较高的 PZT 厚膜图形化。其他的图形化方式如 EDM、超声研磨以及喷砂切割等,也存在着工艺复杂、耗时长等局限性,限制了其在 PZT 厚膜图形化中的广泛应用^[10-11]。

本文中利用飞秒激光加工的高精度、热影响小、无掩膜直写等优点,实现对几十至上百微米 PZT 厚膜的高精度图形化。在研究飞秒激光烧蚀 PZT 厚膜阈值的基础上,对制作的 PZT 压电厚膜驱动器进行了图形化研究。

1 飞秒激光烧蚀 PZT 陶瓷阈值研究

1.1 飞秒激光系统

相对于其他激光,实验中所用飞秒激光具有超短脉宽(130 fs)、超高功率密度(10^{13} W/cm² 以上)等优点,从而在加工过程中具有极小的热影响区域,不会带来烧蚀飞溅粒子污染以及对烧蚀点以外区域

的热影响,而 PZT 陶瓷加工过程中的热效应会对其压电等性能产生不利影响^[12];另外,飞秒激光加工也是一种高精度的无掩膜加工过程。可以看出,飞秒激光加工可以成为 PZT 压电陶瓷图形化的有效方法。

实验中采用江苏大学光子制造科学与技术实验室的大功率飞秒激光加工系统,采用激光 Q-mark 控制软件及步进电机移动装置进行光点和样品的控制移动,实现对样品的烧蚀加工。

表 1 是实验中使用的飞秒激光参数状况。

表 1 飞秒激光参数

Tab. 1 Parameters of femtosecond laser

激光参数	数值
波长 λ/nm	800
脉冲频率 f/kHz	1
脉宽 τ/fs	130
最大输出功率 P/mW	800
束腰大小 2ω ₀ /μm	5.31

1.2 烧蚀阈值研究

在飞秒激光烧蚀材料的研究中,材料的烧蚀阈值是一个重要的参数,所以,实验中首先确定飞秒激光烧蚀 PZT 陶瓷材料的能量阈值。

对于能量高斯分布的激光脉冲,其能量空间分布可以表示为^[13]

$$F(r) = F_0 e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}} \quad (1)$$

式中, r 为与激光束中心的空间距离;峰值能量密度 F_0 可表示为

$$F_0 = \frac{2E_{\text{pulse}}}{\pi\omega_0^2} = \frac{2P}{\pi\omega_0^2 f} \quad (2)$$

所以,在材料的激光烧蚀过程中,烧蚀区域大小与激光能量的关系可以表示为^[13-15]

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{F_0}{F_{\text{th}}}\right) \quad (3)$$

式中, D 为激光烧蚀点的直径大小; F_0 为作用激光脉冲能量; F_{th} 为激光烧蚀材料的阈值大小。

从式(3)可以看出,材料的烧蚀阈值可以理解当烧蚀点大小 D 为 0 时的激光脉冲能量值;可以通过式(3),绘制 D^2 与 $\ln(F_0)$ 的关系曲线进行计算。

实验中采用脉冲数目为 20 的飞秒激光进行 PZT 陶瓷烧蚀阈值的确定。在 50~600 mW 范围内改变激光脉冲能量,通过 Olympus BX51 微分干涉显微镜对 PZT 陶瓷表面烧蚀点进行分析。图 1 为不

同脉冲能量下烧蚀点的显微图像,表 2 为脉冲能量与烧蚀点大小对应关系.图 2 中有方形标记曲线为根据实验所得数据绘制的 D^2 与 $\ln(F_0)$ 关系曲线,无标记曲线为拟合曲线.

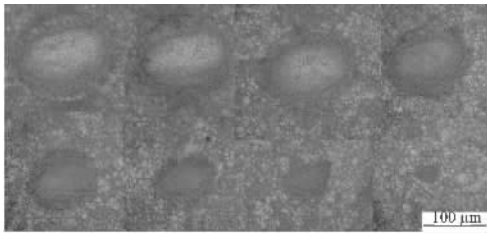


图 1 不同脉冲能量(功率 50~600 mW)作用下 PZT 陶瓷表面烧蚀点状况

Fig. 1 Surface conditions of PZT after laser applied from 50 to 600 mW

表 2 脉冲能量与烧蚀点大小对应关系
Tab. 2 Relations between pulse energy and size of the ablated crater

P/mW	$\ln(P)$	$D/(10 \mu\text{m})$
50	3.91	2
75	4.32	5
100	4.61	7
150	5.01	8.5
250	5.52	10
400	5.99	11
500	6.21	11.5
600	6.39	12

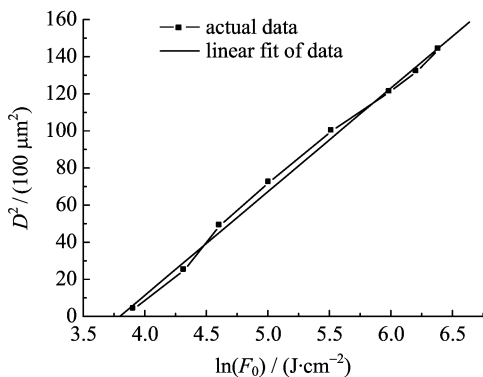


图 2 D^2 与 $\ln(F_0)$ 关系曲线

Fig. 2 Functions of D^2 and $\ln(F_0)$

通过对表 2 中实验数据与图 2 关系曲线的分析及计算,可以得出,PZT 陶瓷材料的烧蚀阈值为 100.11 J/cm^2 ,即对于脉宽为 130 fs 、频率为 1 kHz 的飞秒激光,当平均功率在 44.5 mW 以上时,可以实现对 PZT 陶瓷材料的有效烧蚀.

确定其烧蚀阈值之后,在飞秒激光功率为 50 mW 、扫描速率为 5 mm/s 的情况下对 PZT 陶瓷进行烧蚀加工.结合其无掩膜加工特性,可以实现任意形状的加工研究,这是其他图形化方法难以做到的.如图 3 所示为在 PZT 陶瓷表面加工的沟槽结构及复杂形状,可以看出,飞秒激光加工不会对烧蚀以外区域产生影响,加工区域没有污染.

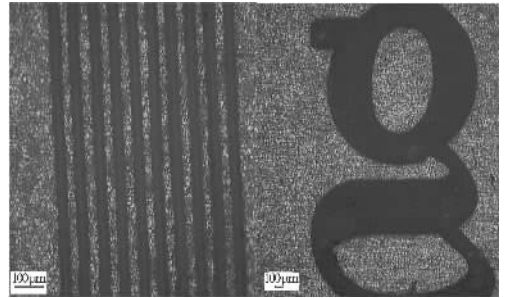


图 3 飞秒激光在 PZT 陶瓷表面加工的结构

Fig. 3 Structures on PZT using femtosecond laser micromachining

2 PZT 厚膜驱动器图形化研究

压电厚膜由于其驱动能力强、性能稳定等优点,得到越来越多的利用.压电膜片驱动器是 PZT 陶瓷应用过程中常见的工作方式.但是,目前仍然没有能够高精度、高效率对 PZT 厚膜驱动器进行图形化的方法.这不但降低了其使用效率,不能充分发挥其驱动能力以达到最佳驱动效果,而且不宜用于批量加工,限制了其在微致动器中的应用.

本文在研究飞秒激光烧蚀 PZT 陶瓷阈值的基础上,利用飞秒激光无掩膜加工技术实现对 PZT 厚膜驱动器的图形化,并对图形化后的 PZT 压电驱动器进行了测试分析.

驱动器结构如图 4 所示.其中压电层厚度为 $40 \mu\text{m}$,结构层为 $30 \mu\text{m}$,膜片尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$.

已有分析表明,当压电层尺寸为结构层尺寸的 $60\% \sim 80\%$ 时(图 4(b)),能够达到较好的驱动效果^[9].利用 130 fs , 300 mW , 1 kHz 的飞秒激光对 PZT 厚膜驱动器进行图形化,扫描速度为 5 mm/s ,重复 5 次烧蚀,最后用 XP-1 台阶仪测得烧蚀厚度为 $33 \mu\text{m}$.对于驱动器尺寸更小或图形精度要求更高时,可对飞秒激光功率及扫描参数等进行控制,得到亚微米的烧蚀图形化精度.图 5 为利用飞秒激光图形化后的 PZT 压电驱动器局部显微图像,(a)图 5 为加工后的局部显微图,(b)图 5 为加工后的膜片驱

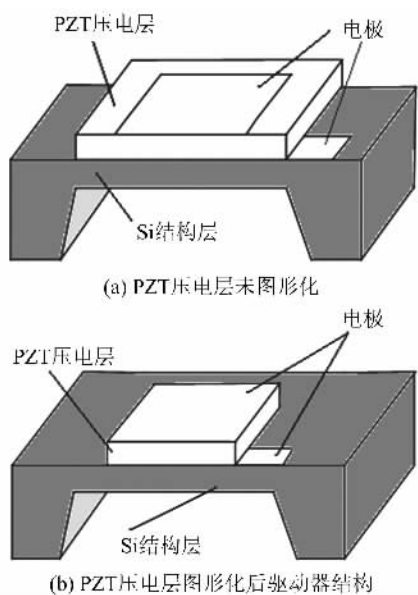
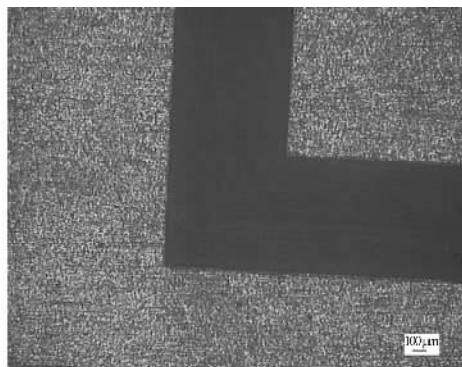
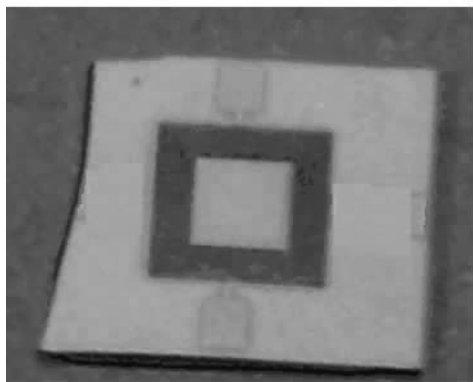


图 4 压电驱动器结构

Fig. 4 Conformation of the PZT actuator



(a) 局部图



(b) 全景图

图 5 飞秒激光对压电驱动器图形化显微图像

Fig. 5 Partial image of PZT actuator after femtosecond laser microamching

驱动器整体效果图。可以看出,飞秒激光能够达到较好的 PZT 图形化结果。

利用激光多普勒微小振动测试仪检测一定驱动电压下驱动器的形变量,通过同等电压下驱动器中心形变量来反映其驱动性能.如图 6 所示,对图形化前后的驱动性能进行比较.由图可见,图形化之后驱动器的性能有明显(30%)地提高,测试结果与理论仿真计算结果一致^[9].而同时由于 PZT 陶瓷弹性模量(70 GPa)相对 Si(200 GPa)较小,图形化之后其刚度变化较小.所以,对压电驱动器压电层材料进行图形化处理,可以增强其驱动能力,提高使用效率;在施加相对较小的驱动电压时,达到与图形化前相同的驱动能力,从而降低能耗。

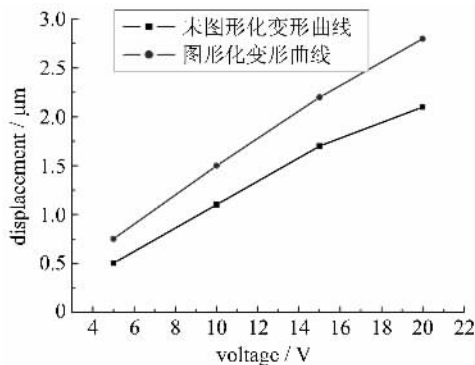


图 6 图形化前后驱动器驱动能量对比

Fig. 6 Comparison of driving ability before & after patterning

3 结论

文中利用 130 fs, 1 kHz 飞秒激光对 PZT 压电陶瓷进行了烧蚀研究.首先通过对不同脉冲能量作用下 PZT 表面烧蚀点的分析,得到一定脉宽和频率的飞秒激光对 PZT 陶瓷的烧蚀阈值;在此基础上,对 PZT 压电厚膜驱动器进行了图形化研究.实验表明,飞秒激光能够作为高效率的 PZT 压电陶瓷图形化方法.利用飞秒激光可以对 PZT 压电陶瓷表面进行多种高精度微加工,也可以利用其无掩膜、真三维加工特点,结合激光光束整形系统及精密的移动控制装置,加工具有复杂结构、形状和高精度的 PZT 压电厚膜驱动器,具有广阔的应用前景。

参考文献(References)

- [1] 田中哲郎. 压电陶瓷材料[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] Hendrickson M, Su T, Trolier-McKinstry S, et al. Processing of PZT piezoelectric thin films for microelectromechanical systems[C]// Proceedings of

- the Tenth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics. East Brunswick, NJ, USA; IEEE, 1996;683-686.
- [3] 刘秦,林殷茵,吴小清,等. PZT 薄膜微图形的制作精度的研究 [J]. 压电与声光, 1998, 20(6):411-413.
- [4] Wang L P, Wolf R, Zhou Q, et al. Wet-etch patterning of lead zirconate titanate (PZT) thick films for microelectromechanical systems (MEMS) applications [C]// Materials Research Society Symposium Proceedings; Vol 657. Boston, MA, USA; Mater Res Soc, 2001;5 391-5 396.
- [5] Miller R A, Bernstein J J. A novel wet etch for patterning lead-zirconate-titanate (PZT) thin-films[J]. Integrated Ferroelectrics, 2000, 29;225-231.
- [6] Zheng Kelu, Lu Jian, Chu Jiaru. A novel wet etching process of Pb(Zr, Ti) O₃ thin films for application in microelectromechanical system [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43; 3 934-3 937.
- [7] Charlet B, Davies K E. Dry etching of PZT films in an ECR plasma[J]. Mater Res Soc Symp Proc, 1993, 310; 363-368.
- [8] Futai N, Matsumoto K, Shimoyama I. Fabrication of high-aspect-ratio PZT thick film structure using sol gel technique and SU-8 photoresist[C]// Proceedings of the Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Las Vegas, NV, USA; IEEE, 2002; 168-171.
- [9] 许晓慧. 基于 PZT 厚膜的 MEMS 微变形镜[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [10] Ballandras S, Wilm M, Gijis M, et al. Periodic array of transducers built using sandblasting and ultrasound micromachining techniques for fabrication of piezocomposite materials [C]// Proceedings of 2001 IEEE Ultrasonics Symposium. Atlanta, GA, USA; IEEE, 2001;871-874.
- [11] Zeng D W, Li K, Yung K C, et al. UV laser micromachining of piezoelectric ceramic using a pulsed Nd: YAG laser [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2004, 78;415-421.
- [12] 言智,郑学军,周益春. 激光热冲击引起 PZT 压电薄膜铁电性能的变化 [J]. 中国激光, 2004, 31 (2): 210-214.
- [13] Liu J M. Simple technique for measurement of pulsed Gaussian-beam spot size [J]. Optics Letters, 1982, 7: 196-198.
- [14] Mannion P, Magee J, Coyne E, et al. Ablation thresholds in ultrafast laser micro-machining of common metals in air[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4 876:470-478.
- [15] Lee K C, Chan C S, Cheung N H. Pulsed laser-induced damage threshold of thin aluminum films on quartz: Experimental and theoretical studies [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79 (8): 3 900-3 905.