

基于准分子激光器的压电陶瓷微结构加工

李以贵¹, 蔡金东², 黄远², 吕瞳², 颜平², 王欢¹

¹上海应用技术大学理学院, 上海 201418;

²上海应用技术大学机械工程学院, 上海 201418

摘要 利用波长为 248 nm 的氟化氪(KrF)准分子激光器加工了掺镧锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)、硅(Si)和聚二甲基硅氧烷(PDMS),研究了准分子激光对这 3 种材料的加工效果。为了解决传统切割工艺加工 PZT 膜片时易发生破裂的问题,研究了准分子激光加工 PZT 微结构的性能。通过调整准分子激光器的激光脉冲能量、脉冲频率、扫描速度及扫描次数等参数,获得了加工参数及其与 PZT 沟槽加工深度和宽度的关系。研究了辅助气体对准分子激光加工 PZT 表面粗糙度的影响。用准分子激光器制备了基于 PZT-Si 复合材料的微悬臂梁和微膜片,并测试了其压电性能。结果表明,利用准分子激光器加工的 2 种 PZT 微压电结构具有良好的压电性能,可作为微压电驱动器的关键器件,验证了用准分子激光器加工 PZT 微结构的可行性。

关键词 激光技术; 微细加工; 准分子激光; 压电陶瓷; 微悬臂梁; 微膜片

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091403

Fabrication of Piezoelectric Ceramic Microstructure Based on Excimer Laser

Li Yigui¹, Cai Jindong², Huang Yuan², Lü Tong², Yan Ping², Wang Huan¹

¹ College of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

² School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

Abstract Plumbum (Pb)-based lanthanum doped zirconate titante piezoelectric ceramic (PZT), silicon (Si) and polydimethylsiloxane (PDMS) are fabricated with 248 nm KrF excimer laser. The processing effects of excimer laser on the above three materials are investigated. To solve the problem that the PZT diaphragm fabricated with traditional dicing process is fragile, the processing performance of PZT microstructure with excimer laser is investigated. The processing parameters and the relationship among processing parameters, processing depth and processing width of PZT substrate are obtained when we adjust several parameters of excimer laser, such as laser pulse energy, pulse frequency, scanning speed and scanning times. Effects of auxiliary gas on the PZT surface roughness processed with excimer laser are studied. The PZT-Si cantilever and PZT-Si diaphragm are fabricated with excimer laser, and their piezoelectric properties are tested. Results show that the two PZT micro-piezoelectric structures fabricated by excimer laser have excellent piezoelectric performance, and the structures can be used as key devices of micro-piezoelectric actuator. The feasibility of processing PZT microstructure with excimer laser is proved.

Key words laser technique; micro-fabrication; excimer laser; piezoelectric ceramic; cantilever; diaphragm

OCIS codes 140.3300; 140.7240; 100.2960; 200.4860

1 引言

压电陶瓷(PZT)是一种由微细晶粒无规则集合而成的多晶体,源于粉粒之间的固相反应和烧结。PZT具有正压电效应和逆压电效应,在换能器件中有着广泛的应用^[1]。微压电驱动器利用压电材料的逆压电效

收稿日期: 2017-03-30; **收到修改稿日期:** 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(51035005)、上海应用技术大学协同创新平台项目(3921NH166019)

作者简介: 李以贵(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事微光机电系统方面的研究。

E-mail: ygli@sit.edu.cn

应,将电能转换为用于驱动的机械能,可以产生微米/纳米量级的位移,具有体积小、响应快、定位精度高等优点,因此压电材料的加工成为微细加工技术的研究热点之一^[2]。

PZT 薄膜的加工往往采用切片法和刻蚀法。切片法方法简单,切面质量好,切削精度可达 $0.2 \mu\text{m}$ ^[3],但在加工过程中切割应力过于集中。PZT 材料既硬又脆,用切片法加工工件容易产生裂纹,且加工周期长,很难加工形成复杂外形^[4]。刻蚀法包括干法刻蚀和湿法刻蚀,其中干法刻蚀成本较高,刻蚀速率较慢;湿法刻蚀速率快且成本低,但加工精度低^[5-6]。电火花微细加工技术是另一种加工脆性材料的工艺,该技术利用工具与工件之间脉冲性火花放电时产生的电腐蚀加工材料,加工过程中电极损耗大,重复性差,所以在生产中的应用还不够成熟和广泛^[7-8]。

准分子激光为峰值功率高、能量大的脉冲激光,波长在紫外波段,目前已用于科研、医疗和工业等诸多领域^[9]。准分子激光微细加工是一种先进的制造技术,激光透过空气、惰性气体或透明体对工件进行无接触加工,激光束的能量及其移动参数均可调,可以实现多种加工目的^[10]。Gatabia 等^[11]使用 248 nm 脉冲激光对 PZT 薄膜进行了加工,并研究了加工过程对 PZT 薄膜压电性能的影响;Butt 等^[12]研究了 248 ns 、 20 ns (波长 248 nm ,曝光时间 20 ns)准分子激光在 20 ns 曝光时间内照射 Al5086 合金对合金硬度的影响;Khodaei 等^[13]利用脉冲激光沉积技术研究了不同 PZT 复合材料的磁化强度和矫顽力等。

本文研究了波长为 248 nm 的氟化氪(KrF)准分子激光对 PZT 压电薄膜的加工性能,并测试了多种材料的加工效果;重点研究了准分子激光对 PZT 基板的加工工艺,获得了准分子激光加工 PZT 薄膜的最优条件。在 PZT 薄膜和硅(Si)的复合基板(PZT-Si)上,利用准分子激光器对 PZT 表面进行图形化加工,制备出可在微压电驱动器中作为关键功能器件使用的微悬臂梁和微膜片,并对其压电性能进行了测试。测试结果表明,用准分子激光加工的 PZT 微结构能够达到预期效果,同时验证了准分子激光加工 PZT 的优异性。

2 实验装置

准分子激光加工为非接触式加工,其与精密机械位移配合可以在较大面积的平面上进行精密加工^[14]。加工过程中可以通过适当调整激光的能量和重复频率、控制工件的位置和运动参数决定加工速度和待加工工件的微结构,具有很大的灵活性。

实验中使用的准分子激光器的加工精度为 $1.5 \mu\text{m}$,能量密度为 $0.1 \sim 25 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,聚焦透镜的聚焦倍数为 $4 \sim 15$ 倍。图 1 为 248 nm KrF 准分子激光加工的工作原理。准分子激光器由激光工作物质、激励能源以及全反射镜与部分反射镜构成的光谐振腔组成。当工作物质被光或放电电流等能源激发后,工作物质的自发辐射光在一定条件下被放大,并通过光谐振腔的作用产生振荡,由光谐振腔的部分反射镜输出激光。准分子激光器发射的激光束通过透镜聚焦到工件的待加工表面,对工件进行加工。KrF 激光加工过程中,激光束能量密度高,加工速度快,且为局部加工,对无激光照射部位几乎没有影响。

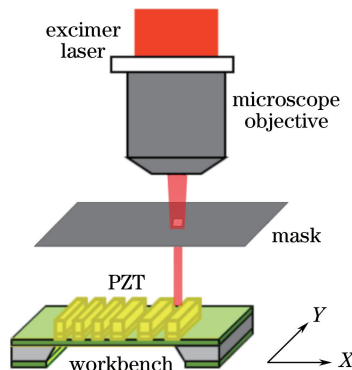


图 1 准分子激光加工的工作原理

Fig. 1 Working principle of excimer laser processing

3 结果与讨论

采用波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光直接烧蚀 PZT、Si、聚二甲基硅氧烷(PDMS) 3 种材料。加工参数如表 1 所示。图 2 为这 3 种材料被加工后的断面扫描电子显微镜(SEM)图,可以看出准分子激光具有较好的加工效果。

表 1 准分子激光的加工参数

Table 1 Processing parameters of excimer laser

Material	Laser pulse energy /mJ	Laser pulse frequency /Hz	Scanning speed /($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
PZT	15.5	200	50
Si	9.0	200	50
PDMS	6.0	200	100

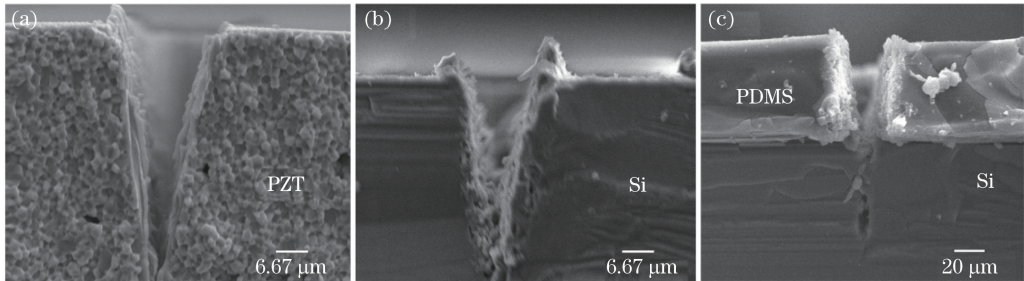


图 2 准分子激光器加工 3 种材料的断面 SEM 图。(a) PZT;(b) Si;(c) PDMS

Fig. 2 Cross section SEM images of three materials processed by excimer laser. (a) PZT; (b) Si; (c) PDMS

3.1 辅助气体对准分子激光加工 PZT 的影响

在准分子激光加工过程中,PZT 材料中含有的铅(Pb)在激光烧灼过程中分解为 Pb 颗粒,然后再次附着在 PZT 表面,造成所加工的沟槽侧壁并不垂直且呈锥形,这些附着在表面的 Pb 颗粒会增加表面粗糙度,影响被加工器件的压电性能。在加工过程中,使用辅助气体来改善加工工件的表面粗糙度,为了获得辅助气体对工件表面粗糙度的改善效果,进行了对比实验,实验中激光脉冲的能量为 11 mJ、重复频率为 100 Hz、扫描速度为 $100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,实验结果如图 3 所示。可以看出,使用辅助气体后黏附在所加工沟槽周边的碎屑明显减少,这说明在准分子激光加工 PZT 的过程中,使用辅助气体可明显减小 PZT 工件表面粗糙度,从而提高器件的加工质量。

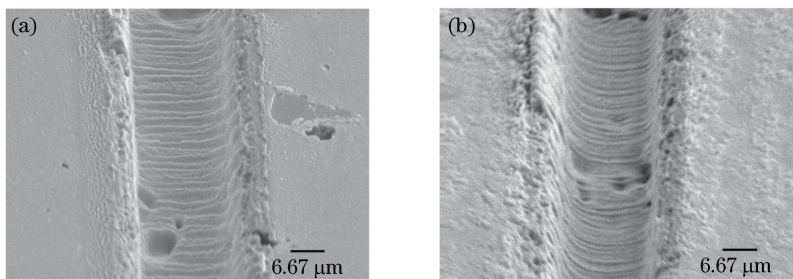


图 3 加工效果对比。(a)使用辅助气体;(b)不使用辅助气体

Fig. 3 Comparison of processing effects. (a) With auxiliary gas; (b) without auxiliary gas

3.2 激光加工参数对 PZT 加工效果的影响

通过调整准分子激光的加工参数,获得了不同参数对 PZT 加工效果的影响。在有辅助气体、激光脉冲频率为 100 Hz、扫描速度为 $100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描次数为 5 的条件下,使用不同脉冲能量的准分子激光束加工 PZT 基板,获得的激光脉冲能量与加工沟槽深度和宽度的关系如图 4 所示。可以看出,随着准分子激光脉冲能量的增大,加工深度随宽度的增加呈线性增加,且宽度增加明显。图 5 为在激光脉冲能量为 11 mJ、扫描速度为 $100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描次数为 5 的条件下,激光脉冲频率与加工深度的关系。可以看出,随着准分子激光脉冲频率的增大,加工深度也线性增加。

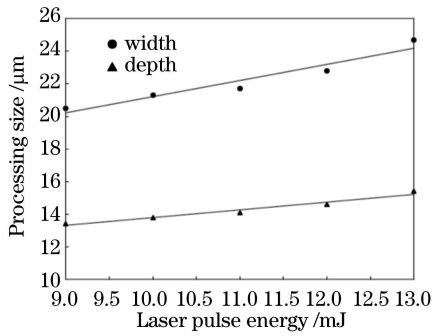


图4 激光脉冲能量与加工深度和宽度的关系
Fig. 4 Relationship among laser pulse energy, processing depth and processing width

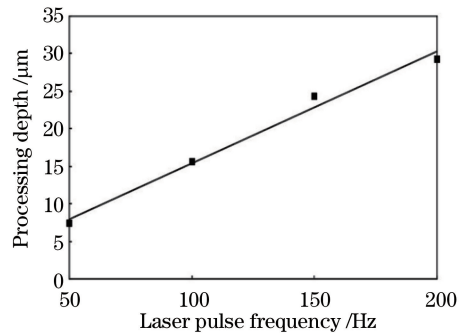


图5 激光脉冲频率与加工深度的关系
Fig. 5 Relationship between laser pulse frequency and processing depth

采用准分子激光对 PZT 薄片进行加工时,不同加工参数对微细加工的结构有不同的影响,这些参数包括激光脉冲能量、脉冲频率、激光束口径、重复次数、有无辅助气体等,此外最重要的两个参数是在激光加工过程中工件的位置和运动参数,二者决定了工件的结构及质量。当准分子激光器发射的脉冲激光保持不动而工件移动时,在 PZT 基板上进行图形化加工,加工结果如图 6 所示。可以看出,准分子激光对 PZT 薄片的微细加工有较高的精度,且重复性好,灵活性好,达到了实验的预期效果。

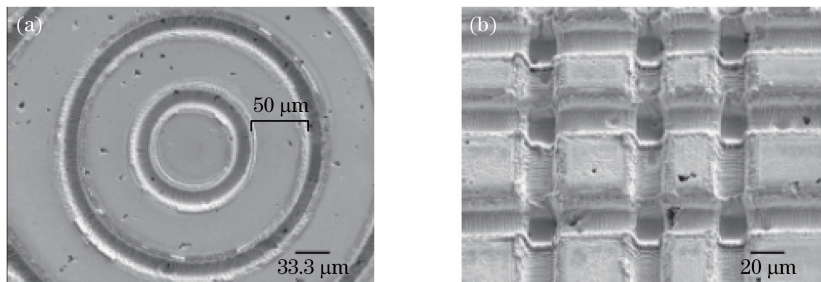


图6 准分子激光对 PZT 基板的图形化加工。(a)同心圆;(b)矩形块

Fig. 6 Graphical processing on PZT substrate with excimer laser. (a) Concentric circles; (b) rectangular blocks

在其他激光加工参数不变的情况下,通过调整工件台的扫描次数和速度,可以获得扫描次数及速度与 PZT 基板沟槽加工深度的关系。采用 3 种不同方形口径(25, 40, 50 μm)的激光束对 PZT 基板进行加工,在激光脉冲能量为 18 mJ、脉冲频率为 300 Hz、扫描速度为 200 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下,得到了激光扫描次数与加工深度的关系,如图 7 所示。可以看出,加工深度随扫描次数的增加基本呈线性增大;激光口径越大,加工深度越大。在激光脉冲能量为 15.5 mJ、脉冲频率为 300 Hz 的准分子激光扫描 1 次的条件下,扫描速度与加工深度的关系如图 8 所示。可以看出,随着扫描速度的增大,加工深度减小。

3.3 微结构的压电性能

基于得到的加工数据,制备 PZT-Si 微膜片和 PZT-Si 微悬臂梁 2 种微结构,并测试二者的压电性能。PZT-Si 微膜片和 PZT-Si 微悬臂梁是微压电驱动器的关键器件,传统切割工艺加工的 PZT 基板经常发生碎裂,而采用准分子激光加工能够克服这一缺陷,同时准分子激光可以批量加工,有利于降低生产成本。通过移动基板完成了 PZT-Si 微膜片的图形化加工,加工效果如图 9(a)所示,所加工的微膜片尺寸为 1.6 mm \times 1.6 mm \times 52 μm 。利用准分子激光器将微膜片镂空处击穿,获得尺寸为 1450 $\mu\text{m}\times$ 300 $\mu\text{m}\times$ 68 μm 的 PZT-Si 微悬臂梁结构,如图 9(b)所示。

搭建微驱动器性能测试系统,对 2 种微压电结构的驱动性能进行测试,获得的施加电压与位移的关系如图 10 所示。当施加的电压为 20 V 时,微悬臂梁尖端的位移为 2.94 μm ,微膜片中心的位移为 0.694 μm ,且位移量与施加电压具有良好的线性关系,表明利用准分子激光器加工的 2 种 PZT 微压电结构具有良好的驱动性能,可作为微压电驱动器的关键器件。

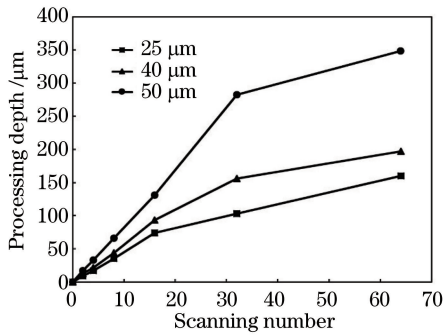


图7 不同口径激光束下扫描次数与加工深度的关系
Fig. 7 Relationship between scanning number and processing depth under lasers with different apertures

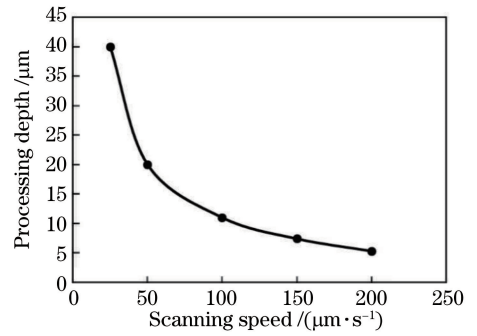


图8 扫描速度与加工深度的关系
Fig. 8 Relationship between scanning speed and processing depth

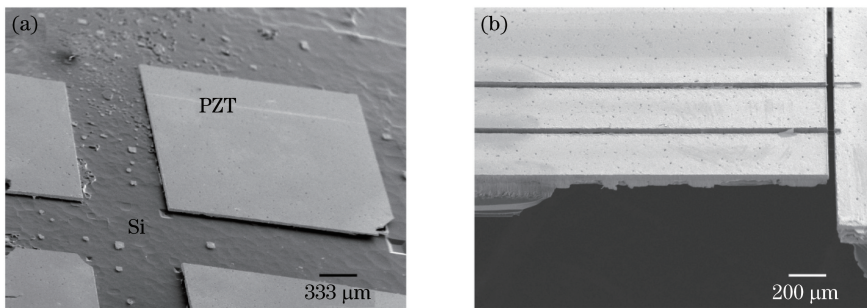


图9 准分子激光加工的微结构。(a) PZT-Si 微膜片;(b) PZT-Si 微悬臂梁

Fig. 9 Microstructure fabricated with excimer laser. (a) PZT-Si diaphragm; (b) PZT-Si micro-cantilever

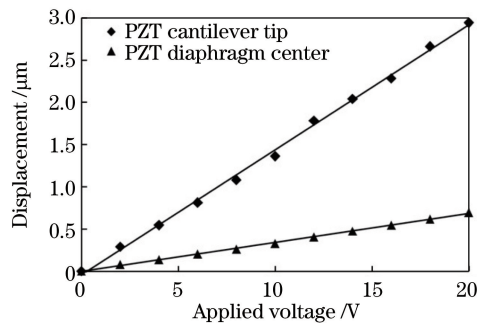


图10 制备的2种微结构的驱动性能

Fig. 10 Driving performance of two fabricated microstructures

4 结 论

基于准分子激光微细加工技术,研究了PZT压电陶瓷和硅的微结构加工工艺,重点研究了准分子激光器加工参数对PZT压电陶瓷加工效果的影响。结果表明,该加工工艺能够对PZT基板进行图形化加工,加工精度较高、速度快、灵活性好,对超硬材料的微图形化加工有重要意义。通过调整准分子激光参数,得到了激光加工PZT膜片的最优加工条件。在准分子激光脉冲能量为15.5 mJ、脉冲频率为300 Hz、扫描速度为 $25 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描条件下,加工深度达 $40 \mu\text{m}$,为不同情况下PZT薄片的加工提供了参考。用准分子激光加工了PZT-Si微膜片和PZT-Si微悬臂2种微压电驱动器,并测试了二者的驱动性能。实验结果验证了准分子激光加工工艺制备PZT微结构的可行性。

参 考 文 献

- [1] Li Yafeng. Preparation of the PZT-based piezoelectric ceramic and application in the acceleration sensor[D]. Henan: Zhengzhou University, 2016: 1-18.
李亚丰. PZT 基压电陶瓷的制备及在加速度传感器中的应用[D]. 河南: 郑州大学, 2016: 1-18.
- [2] Han Huajun. Experiment and research on ultra-precision grinding process of medical piezoelectric ceramics slice[D]. Jiangsu: Soochow University, 2009: 2-31.
韩华军. 医用压电陶瓷片的超精密磨削加工实验研究[D]. 江苏: 苏州大学, 2009: 2-31.
- [3] Zhang Tiemin, Xu Zhilin, Cao Fei, *et al.* Design and experiment of a power supply to drive a macro-micro piezoelectric actuator[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2015, 37(1): 167-171.
张铁民, 许志林, 曹 飞, 等. 宏微压电驱动器的电源设计与试验[J]. *压电与声光*, 2015, 37(1): 167-171.
- [4] Luo Yan, Wu Xiaobin, Zhou Yi, *et al.* Interaction between excimer laser and SiC ceramic[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121403.
罗 艳, 吴晓斌, 周 翊, 等. 准分子激光与 SiC 陶瓷的相互作用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121403.
- [5] Tang Gang, Liu Jingquan, Yang Chunsheng, *et al.* Preparation and micro-patterning of bulk PZT thick films for piezoelectric micropower harvester[J]. *Vacuum*, 2011, 48(2): 19-21.
唐 刚, 刘景全, 杨春生, 等. 压电微能量采集器 PZT 厚膜制备及其图形化研究[J]. *真空*, 2011, 48(2): 19-21.
- [6] Shao Weiping, Zhang Fenghu, Liu Shuangjie, *et al.* Micro-EDM parameter optimization and machining quality analysis [J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(3): 46-48.
邵伟平, 张凤虎, 刘双杰, 等. 微细电火花加工参数优化及加工质量分析[J]. *工具技术*, 2015, 49(3): 46-48.
- [7] Fu Xiuzuo. Study on the processes and mechanism of piezoelectric self-adaptive microelectrical discharge machining[D]. Shandong: Shandong University, 2012: 17-26.
付秀琢. 压电自适应微细电火花加工技术及机理研究[D]. 山东: 山东大学, 2012: 17-26.
- [8] Wang Shi, Guo Jianwen, Jiang Wuxue, *et al.* Simulative study of machining mechanism of material in micro-EDM[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(12): 2891-2897.
王 石, 郭建文, 江务学, 等. 微细电火花加工中材料蚀除机理的仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(12): 2891-2897.
- [9] Jin Yuhua, Zhao Yan, Jiang Yijian. Microlens beam shaping and homogenizing optical system for excimer laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0602003.
靳羽华, 赵 艳, 蒋毅坚. 准分子激光微透镜整形均束装置[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602003.
- [10] Luo C, Li Y, Susumu S. Fabrication of high aspect ratio subwavelength gratings based on X-ray lithography and electron beam lithography[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1649-1653.
- [11] Gatabia J R, Rahmana S, Amarob A, *et al.* Tuning electrical properties of PZT film deposited by pulsed laser deposition[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(8): 6008-6012.
- [12] Butt M Z, Majeed A M, Khaliq M W, *et al.* Structural, electrical, and mechanical characterization of Al 5086 alloy irradiated with 248 nm-20 ns KrF excimer laser[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 3069-3082.
- [13] Khodaei M, Eshghinejad A, Ebrahimi S A A. Nanoscale magnetoelectric coupling study in (111)-oriented PZT-Co ferrite multiferroic nanobilayer thin film using piezoresponse force microscopy: Effect of Co ferrite composition[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2016, 242: 92-98.
- [14] Wan Qiang, Lu Yimin, Mi Chaowei, *et al.* Reserch on anti-reflective diamond-like carbon film deposited by 248 nm nanosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 093101.
万 强, 陆益敏, 米朝伟, 等. 248 nm 纳秒激光沉积类金刚石增透保护膜的工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 093101.