

文章编号: 0258-7025(2010)12-3127-06

PZT 薄膜制备及激光感生热电电压研究

尚 杰 张 辉 曹明刚 张鹏翔

(昆明理工大学光电子新材料研究所, 云南 昆明 650051)

摘要 采用脉冲激光沉积(PLD)技术,在 SrTiO₃ (STO)单晶衬底上成功地制备了不同组分 x ($x=0.03, 0.30, 0.53, 0.80, 0.97$) 和掺杂 M (原子数分数为 3%, $M=Na, Sr, Bi, Ce$) 的锆钛酸铅 [Pb(Zr _{x} Ti _{$1-x$}), PZT] 铁电薄膜。检测结果表明,所有薄膜都是单一取向生长的,且没有杂相存在,但组分的改变和掺杂元素的引入会对薄膜的结晶质量产生不同程度的影响。另外,在 10° 倾斜的 SrTiO₃ 单晶衬底上生长的 PZT 铁电薄膜中还清楚地观察到了激光感生热电电压(LITV)信号,且在能量密度为 0.16 J/cm² 的紫外脉冲激光辐照下, $x=0.03$ 组分的 PZT 铁电薄膜中的 LITV 信号最大,峰值电压为 60 mV,而在 Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃ 铁电薄膜中,掺杂元素 Na 时 LITV 信号最大,峰值电压为 61 mV,这与不掺杂时相比,其峰值电压增大了近 50%。

关键词 薄膜;铁电薄膜;激光感生热电电压信号;脉冲激光沉积;组分和掺杂;X 射线衍射

中图分类号 0484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3127

Preparation of PZT Thin Films and Research of Laser-Induced Thermoelectric Voltage

Shang Jie Zhang Hui Cao Minggang Zhang Pengxiang

(Institute of Advanced Materials for Photoelectronics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract Using pulse laser deposition(PLD) technology, different component x ($x=0.03, 0.30, 0.53, 0.80, 0.97$) and doped M (atom fraction 3%, $M=Na, Sr, Bi, Ce$) PZT ferroelectric thin films were successfully prepared on SrTiO₃ monocrystalline substrates. The test results of XRD showed that all the thin films were single-phase and highly oriented. But the changes of components and doped elements could affect the crystallinity of thin films in various degrees. Furthermore, laser-induced thermoelectric voltage (LITV) signals were measured clearly in PZT ferroelectric thin films grown on 10° vicinal-cut SrTiO₃ monocrystalline substrates. Through researching the influence of components and doped elements on the size of the signal, the maximum LITV signal was found under UV light irradiation of 0.16 J/cm². For different component PZT ferroelectric thin films, the maximum peak voltage was 60 mV if and only if the component was $x=0.03$. For different doped Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃ ferroelectric thin films, the maximum peak voltage was 61 mV if and only if the doped element was Na, which increased nearly 50% compared with the maximum peak voltage of no doped Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃ ferroelectric thin films.

Key words thin films; ferroelectric thin films; laser-induced thermoelectric voltage signals; pulse laser deposition; components and dopings; X-ray diffraction

1 引 言

锆钛酸铅(PZT)铁电薄膜是迄今为止研究最多,应用最广的一类铁电薄膜材料。由于它具有优异的铁电^[1,2]、压电^[3]、介电^[4]和光电^[5]性能,且其铁

电、压电和介电性能可通过改变 Zr/Ti 的组分比^[6,7]以及掺杂的方法得以改善^[8~11],是目前制备非易失性存储器^[12,13]、压电振荡器^[14]、红外探测器^[15]、光调制器^[16]和声表面波器件^[17]等的理想材料,至今人

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(10274026)资助课题。

作者简介: 尚 杰(1979—),男,博士研究生,主要从事氧化物薄膜材料方面的研究。E-mail: sjkm06@yahoo.com.cn

导师简介: 张鹏翔(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事强关联材料方面的研究。E-mail: pxzhang@hotmail.com

们的兴趣依然不减。因此,研究 PZT 铁电薄膜的制备、结构和性能具有重要的意义。

但是,由于 PZT 铁电薄膜的化学组成复杂,且性能对组分的变化很敏感,这很不利于薄膜的制备。为了获得满足高性能电子器件要求的 PZT 铁电薄膜,人们已尝试了多种薄膜制备方法,如溶胶-凝胶(Sol-Gel)法^[18,19]、射频磁控溅射(rf-magnetron sputting)法^[20,21]、金属有机化学气相沉积(MOCVD)法^[22,23]、脉冲激光沉积(PLD)法^[24~27]等。由于脉冲激光沉积工艺具有沉积参数易调、生长速率高、组分易于控制等突出优点,被认为是目前制备像铁电材料这类具有复杂组分薄膜的较好方法。因此,本文采用脉冲激光沉积法,研究了不同组分和掺杂的 PZT 铁电薄膜的制备工艺,发现并报道

了组分和掺杂元素对 PZT 铁电薄膜激光感生热电电压(LITV)信号大小的影响。

2 实 验

利用 PLD 技术在 SrTiO₃ 单晶衬底上分别沉积了不同组分和掺杂的 PZT 铁电薄膜。沉积时, KrF 准分子激光器(LPX300I 型)发出 248 nm 波长的紫外脉冲激光,脉冲宽度为 28 ns,经凸透镜聚焦后的能量密度为 2.0 J/cm², 高能脉冲激光束打到靶的表面并蒸熔靶材,形成等离子体羽辉,在 50 Pa 的流动氧压下等离子体羽辉定向局域膨胀,在已加热的衬底上沉积成膜。衬底与靶表面平行,距离为 4.5 cm,本底压强为 1 × 10⁻³ Pa。具体沉积条件如表 1 所示。

表 1 PZT 铁电薄膜的沉积条件

Table 1 Deposition conditions of PZT ferroelectric thin films

Thin films	Best deposition conditions						
	Temperature / °C	Frequency / Hz	Anneal time / min	Anneal pressure / Pa	Oxygen pressure / Pa	Pulsed laser energy / mJ	
PbZr _{0.03} Ti _{0.97} O ₃ (<i>c</i> orientation)	621	5	30	5000	50 (flowing)	270	
PbZr _{0.30} Ti _{0.70} O ₃ (<i>a</i> orientation)	485	5	30	5000	50 (flowing)	270	
PbZr _{0.53} Ti _{0.47} O ₃ (<i>c</i> orientation) (or doped films)	689	5	30	5000	50 (flowing)	270	
PbZr _{0.80} Ti _{0.20} O ₃ (<i>c</i> orientation)	679	5	30	5000	50 (flowing)	270	
PbZr _{0.97} Ti _{0.03} O ₃ (<i>c</i> orientation)	623	5	30	5000	50 (flowing)	270	

薄膜的晶化特征与结构用 Peking University BDX3200 型 X 射线衍射仪进行测量,测量时用 CuK α 射线做光源($\lambda = 1.54056 \times 10^{-10}$ m)。LITV 信号的测量则利用 KrF 准分子激光做光源,以生长在斜切的 SrTiO₃ 单晶衬底上的 PZT 薄膜作为探测元件,产生的 LITV 信号由 Tektronix-TDS210 型示波器进行采集,采样频率为 1 GHz,示波器采集的 LITV 信号直接输入到计算机中存储。

3 结果分析与讨论

3.1 PZT 薄膜的 XRD 分析

图 1 给出了不同组分和掺杂的 PZT 薄膜 XRD 图谱。从图谱中可以看出,在 SrTiO₃ 单晶衬底上制备的样品为单相,且具有明显的 *c*(或 *a*)轴择优取向。

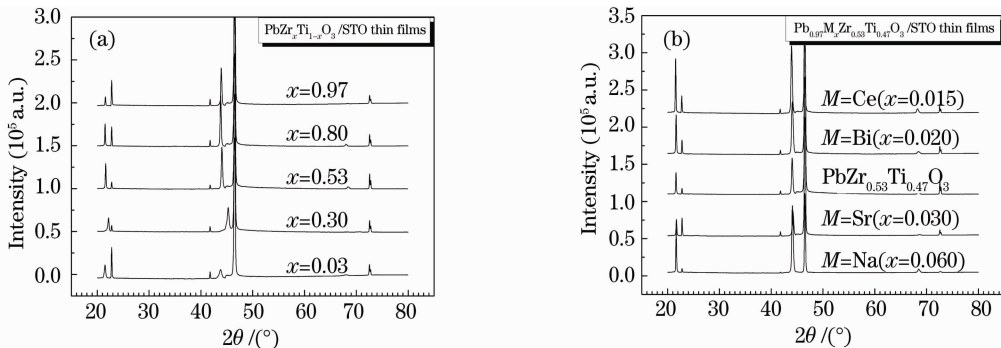


图 1 PZT 薄膜的 XRD 图谱。(a) 不同组分, (b) 不同掺杂

Fig. 1 XRD patterns of PZT thin films. (a) different components, (b) different dopings

图 2 为不同组分和掺杂的 PZT 薄膜摇摆曲线。由图可见,随着组分的改变和掺杂元素的引入,其衍

射峰的位置发生了不同程度的偏移,衍射峰位置的改变表明薄膜的晶格结构(晶格常数)发生了变化,

必将会导致 PZT 铁电薄膜与 SrTiO₃ 衬底间晶格失配度的变化。根据摇摆曲线衍射峰的位置,计算了 PZT 铁电薄膜的晶格常数,并由薄膜与衬底间的失配度定义: $\delta = 2|a_s - a_c| / (a_s + a_c)$ (其中 a_s 指无应力时衬底的晶格常数, a_c 指薄膜的晶格常数),得到了薄膜与衬底 ($a_{\text{STO}} = 3.905 \times 10^{-10}$ m) 间的晶格失配度,如图 3 所示。众所周知,薄膜的外延生长强烈地依赖于薄膜与衬底间的匹配度。这主要是由于晶格失配会产生应力,为了释放应力,就会有失配位错产生,因此晶格失配度会影响薄膜内的应变和位错密度,进而影响结晶质量。一般情况下,薄膜与衬底之间的晶格失配度越小,薄膜的外延质量就越好。从图 3 中可以看出,晶格失配度都在 8% 以内,失配

度相对较小,表明 SrTiO₃ 单晶衬底比较适合于 PZT 薄膜的生长。

另外,组分的改变和掺杂元素的引入不仅使其衍射峰的位置发生了偏移,其半峰全宽(FWHM)也发生了变化(如图 2 左上角所示)。图 2(a)为不同组分 PZT 铁电薄膜的摇摆曲线,可以看出 $x=0.53$ 和 0.97 组分的 PZT 铁电薄膜 FWHM 相对较小,分别为 0.36° 和 0.34°。FWHM 越小,薄膜的结晶质量也就越好,说明这两个组分的薄膜结晶质量相对较好。图 2(b)为不同掺杂的 PZT 铁电薄膜的摇摆曲线,不难发现微量掺杂后,摇摆曲线的 FWHM 都有所增大,但变化不大。

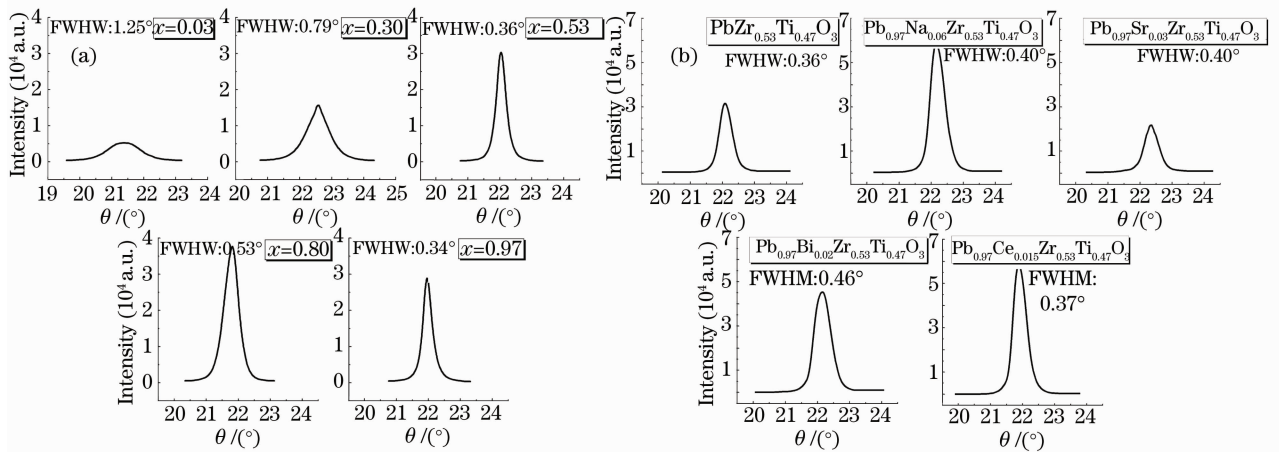


图 2 PZT 薄膜的摇摆曲线。(a) 不同组分, (b) 不同掺杂

Fig. 2 Rocking curves of PZT thin films. (a) different components, (b) different dopings

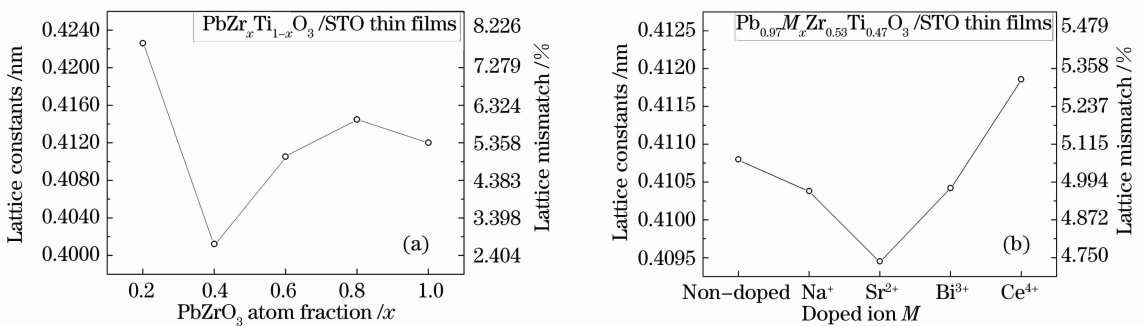


图 3 PZT 薄膜的晶格常数与晶格失配度的变化曲线。(a) 不同组分, (b) 不同掺杂

Fig. 3 Change curves of lattice constants and lattice mismatch. (a) different components, (b) different dopings

3.2 PZT 薄膜中的 LITV 信号分析

在倾斜衬底上生长的薄膜中的 LITV 效应实际上是一种温差电效应,它是由各向异性的 Seebeck 系数引起的。因为在倾斜衬底上生长的外延膜是沿台阶流动生长的,所以薄膜的 ab 晶面与表面法线方向 n 之间存在一个夹角 α (理论上等于衬底的倾斜角度),如图 4 所示。根据 Lengfeller 等提出的原子

层热电堆模型,当膜的表面吸收了脉冲激光辐照的能量后,能量沿 ab 晶面迅速传递,在膜内 n 方向上瞬间建立起一个温度梯度场,由于薄膜面内与面间输运性质的各向异性(即 $S_{ab} \neq S_c$, S_{ab} 和 S_c 分别为薄膜内 ab 面和 c 轴方向上的 Seebeck 张量分量),便产生了横向的 LITV 效应。

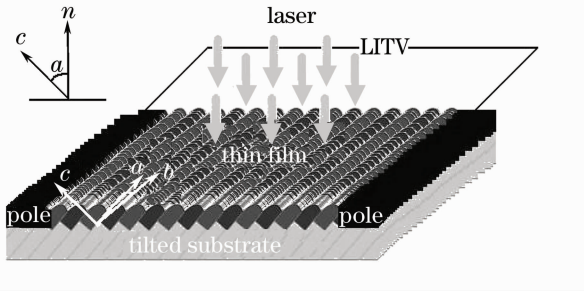


图4 倾斜衬底上生长的薄膜的LITV效应原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of LITV effect in film grown on tilt substrate

3.2.1 改变PZT薄膜的组分和掺杂

图5给出了在 10° 倾斜的 SrTiO_3 单晶衬底上制备的不同组分和掺杂的PZT铁电薄膜中的LITV信号。从图中可以看出,对于不同组分的PZT铁电

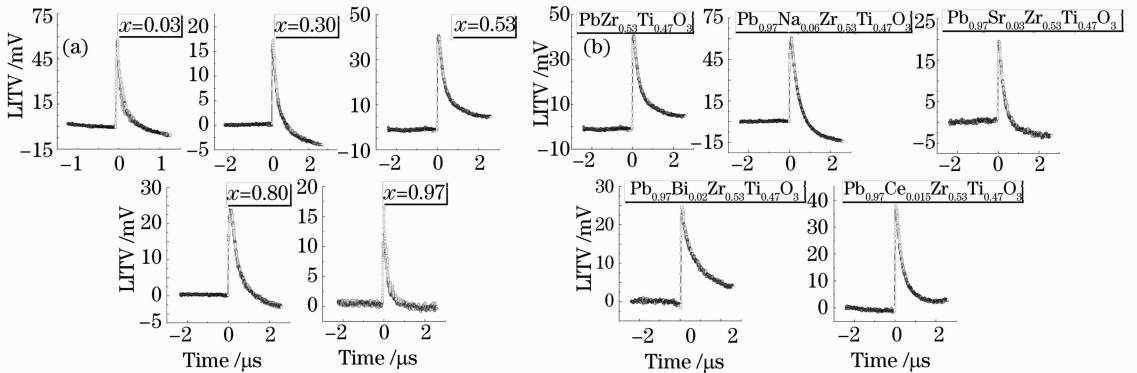


图5 PZT薄膜的LITV信号。(a)不同组分,(b)不同掺杂

Fig. 5 LITV signals of PZT thin films. (a) different components, (b) different dopings

3.2.2 改变影响LITV信号的参数

2002年,张鹏翔等^[28]在原子层热电堆模型的基

础上,通过建立微电源网络模型及瞬时平面热源模型,推导出了一个显含时间演变的LITV公式

$$U(t) = \frac{\alpha_0 E l \sin(2\alpha)}{4d\rho c_0 \sqrt{\pi Dt}} (S_{ab} - S_c) \{ \exp[-\delta/(4Dt)] - \exp[-d^2/(4Dt)] \}, \quad (1)$$

式中 α_0 为薄膜对激光的吸收系数, E 为单脉冲激光的能量, l 为激光辐照的薄膜长度, α 为衬底的倾斜角度, δ 为激光对该薄膜的穿透深度, d 为薄膜的厚度, ρ 为薄膜的密度, c_0 为薄膜的比热容, D 为薄膜的热扩散系数。许多实验结果已经验证,(1)式与实际情况符合得很好^[29~31]。因此,可以根据(1)式对影响PZT薄膜LITV信号的参数进行讨论。

测试了A,B,C三个系列的薄膜,分别探讨了单脉冲激光的能量、衬底的倾斜角度以及薄膜的厚度对LITV信号大小的影响,如图6所示。

薄膜的LITV信号[图5(a)],随着 x 的增大其信号的大小呈减小的趋势,只有当 $x=0.30$ 时不满足这个规律,这可能和薄膜的生长取向有关系。因为这个组分的薄膜沿 a 取向生长的晶格失配度(2.60%)相对于沿 c 取向生长的晶格失配度(7.14%)要小得多,所以它易于长成 a 取向。而其他4个组分的薄膜在该实验条件下都是沿 c 取向生长的。对于不同掺杂的 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ 薄膜的LITV信号[图5(b)],由于掺杂元素的不同其LITV信号的大小相对于没掺杂时(峰值电压为41 mV)也发生了不同的变化,有的变大了(如掺 Na^+ ,峰值电压为61 mV),有的变小了(如掺 Sr^{2+} 和 Bi^{3+} ,峰值电压分别为20 mV和25 mV),有的则变化不大(如掺 Ce^{4+} ,峰值电压为39 mV)。这主要是因为掺杂元素的引入不但可以改变薄膜的微观结构,而且在一定程度上还可以改变薄膜的电性能。

A系列[图6(a)]薄膜为单脉冲激光能量(E)对信号峰值电压(U)大小的影响。从图中可以看出,随着单脉冲激光能量的增加,LITV信号几乎是线性增大的,即 $U \propto E$,这与(1)式是相符的。但PZT薄膜对单脉冲激光能量的承受能力是有限的,一般在100 mJ以内,超出这个限度时薄膜就会被损坏,其性能自然也会降低,因此当单脉冲激光能量大于102 mJ时,LITV信号有下降的趋势。

B系列[图6(b)]为衬底的倾斜角度(α)对信号大小的影响。分别测量了5个倾斜角度($0, 5^\circ, 10^\circ,$

15°, 20°) 薄膜中的 LITV 信号。由图可见, LITV 信号的峰值电压随着 $\sin(2\alpha)$ 的增大而增大, 且 $U \propto \sin(2\alpha)$, 这与(1)式也是相符的。只有倾斜角度为 20° 时偏离得比较大, 分析其原因可能为倾斜角为 20° 时, 衬底的台阶密度较高, 致使 PZT 薄膜中断层、错层等缺陷增加, 阻碍电子或空穴的输运, 从而导致了 LITV 信号峰值电压的降低。

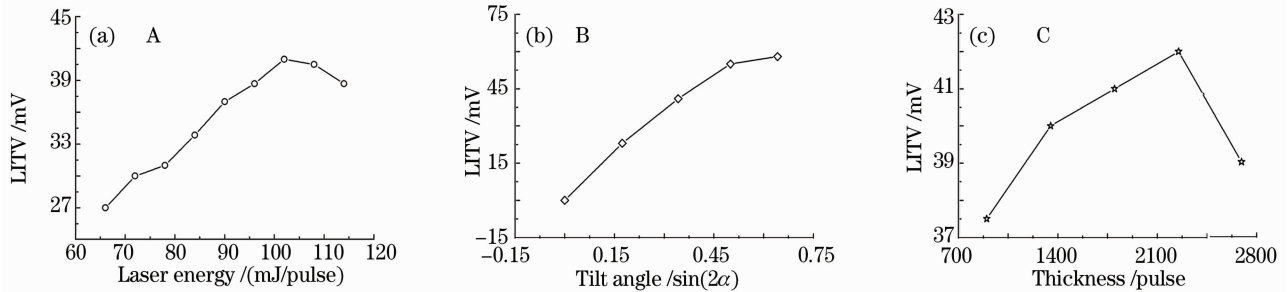


图 6 不同参数对 LITV 信号的影响

Fig. 6 Influence of different parameters on LITV signals

4 结 论

采用脉冲激光沉积技术, 在 SrTiO₃ 单晶平衬底上通过一系列的优化实验成功地获得了高质量 PZT 铁电薄膜的制备工艺。利用此工艺, 在 10° 倾斜的 SrTiO₃ 单晶衬底上生长的 PZT 铁电薄膜中还观察到了 LITV 信号。研究发现, 改变组分、掺杂元素以及单脉冲激光能量、衬底倾斜角度、膜的厚度都可以明显改善 LITV 信号的大小, 这为基于 LITV 效应器件的研制和开发提供了一些参考。

参 考 文 献

- 1 S. H. Han, W. S. Ahn, H. C. Lee. Ferroelectric properties of heteroepitaxial PbTiO₃ and PbZr_{1-x}Ti_xO₃ films on Nb-doped SrTiO₃ fabricated by hydrothermal epitaxy below Curie temperature [J]. *J. Mater. Res.*, 2007, **22**(4): 1037~1042
- 2 H. Q. Fan, S. H. Lee, C. B. Yoon *et al.*. Perovskite structure development and electrical properties of PZN based thin films [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, **22**(9-10): 1699~1704
- 3 Herdier Romain, Leclerc Gerald, Poullain Gilles. Investigation of piezoelectric and electrostrictive properties of (Pb_{1-3y/2}La_y(Zr_xTi_{1-x})O₃) ferroelectric thin films using a doppler laser Vibrometer [J]. *Ferroelectrics*, 2008, **362**(1): 145~151
- 4 B. L. Ahn, J. Lee, S. M. Park *et al.*. Influence of precursor solution coating parameters on structural and dielectric properties of PZT thick films [J]. *J. Mater. Sci.*, 2008, **43**(10): 3408~3411
- 5 Peng Shi, Yao Xi. Electrical and optical properties of PZT ferroelectric films fabricated by the PVP-assisted sol-gel method [J]. *J. Electroceram.*, 2008, **21**(1-4): 516~519
- 6 B. D. Hahn, D. S. Park, J. J. Choi *et al.*. Effects of Zr/Ti ratio and post-annealing temperature on the electrical properties of lead zirconate titanate (PZT) thick films fabricated by aerosol

C 系列[图 6(c)]为薄膜厚度 d 对信号大小的影响。根据(1)式, 薄膜厚度应该存在一个最佳值。从图中可以看出, 随着镀膜厚度的增加(脉冲数的增大), 信号先增大后减小, 当脉冲数为 2250 时, 信号最大, 即在 1800~2700 pulse 之间存在一个最佳厚度。这个实验结果与(1)式也是相符的。

- deposition [J]. *J. Mater. Res.*, 2008, **23**(1): 226~235
- 7 C. S. Park, S. M. Lee, H. E. Kim. Effects of excess PbO and Zr/Ti ratio on microstructure and electrical properties of PZT films [J]. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 2008, **91**(9): 2923~2927
- 8 C. Y. Shao, J. Wang, W. J. Dong *et al.*. Effect of europium doping on Electrical properties of PZT films [J]. *Surf. Rev. Lett.*, 2008, **15**(1-2): 1~5
- 9 S. J. Kim, J. Y. Ha, J. W. Choi *et al.*. Piezoelectric and dielectric properties of 0.05Pb(Al_{0.5}Nb_{0.5})O₃-0.95Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃ ceramics doped with Nb₂O₅ and MnO₂ [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(2): 691~694
- 10 Zhang Zhen, Li Lu, Chang Shu *et al.*. Ferroelectric properties of W-doped lead zirconate titanate [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(7): 074119
- 11 R. S. Nasara, M. Cerqueira, E. Longob *et al.*. Experimental and theoretical study of the ferroelectric and piezoelectric behavior of strontium-doped PZT [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, **22**: 209~218
- 12 Pi-Chun Trevor Juan, Cheng-Li Lin, Wen-Chieh Shih *et al.*. Fabrication and characterization of metal-ferroelectric (PbZr_{0.6}Ti_{0.4})O₃-insulator (La₂O₃)-semiconductor capacitors for nonvolatile memory applications [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**(6): 061625
- 13 Chung-Yuan Chang, Pi-chun Trevor Juan, Joseph Ya-min Lee. Fabrication and characterization of metal-ferroelectric (PbZr_{0.53}Ti_{0.47})O₃-insulator (Dy₂O₃)-semiconductor capacitors for nonvolatile memory applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(7): 072917
- 14 He Xiyun, Zhang Yong, Ding Aili *et al.*. Fabrication and characteristics of PZT thick films on Pt/Ti foil substrates for piezoelectric vibrators [J]. *J. Electroceram.*, 2008, **21**(1-4): 871~874
- 15 R. W. Whatmore, P. C. Osbond, N. M. Shorrocks *et al.*. Ferroelectric material for thermal IR detectors [J]. *Ferroelectrics*, 1987, **76**(1): 351~367
- 16 T. Kawaguchi, H. Adachi, K. Setsune *et al.*. PLZT thin-film waveguides [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(13): 2187~2191
- 17 Sun Shunming. Material systems and functional properties of ferroelectric thin films [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic*

- Society*, 1999, **18**(4): 71~75
- 孙顺明. 铁电薄膜的材料系统与功能性质 [J]. *硅酸盐通报*, 1999, **18**(4): 71~75
- 18 Xiong Sabei, Hiroshi Kawada, Yamanaka Hiroshi *et al.*. Piezoelectric properties of PZT films prepared by the sol-gel method and their application in MEMS [J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**(16): 5309~5312
- 19 S. K. Pandey, A. R. James, C. Prakash *et al.*. Electrical properties of PZT thin films grown by sol-gel and PLD using a seed layer [J]. *Mat. Sci. Eng. B*, 2004, **112**(1): 96~100
- 20 Ravindra Singh, B. R. Chakraborty, Nahar Singh *et al.*. Compositional and structural analysis of RF magnetron sputtered La^{3+} -modified PZT thin films [J]. *J. Mater. Proc. Tech.*, 2009, **209**(2): 991~997
- 21 T. Suzuki, I. Kanno, J. J. Loverich *et al.*. Characterization of $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ thin films deposited on stainless steel substrates by RF-magnetron sputtering for MEMS applications [J]. *Sensors and Actuators. A, Physical*, 2006, **125**(2): 382~386
- 22 Xie Dan, Ruan Yong, Li Rui *et al.*. Comparison of $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ thin films deposited on different substrates by liquid delivery metal organic chemical vapor deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**(6): 061611
- 23 S. Aggarwal, K. R. Udayakumar, J. A. Rodriguez. Stoichiometry and phase purity of $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ thin films deposited by metal organic chemical vapor deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(6): 064103
- 24 Y. H. Yu, M. O. Lai, L. Lu. Highly (100) oriented $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{LaNiO}_3$ films grown on amorphous substrates by pulsed laser deposition [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **88**(2): 365~370
- 25 A. Purice, G. Dinescu, N. Scarisoreanu. Ferroelectric thin films obtained by pulsed laser deposition [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, **26**(14): 2937~2943
- 26 Zhu Jie, Xie Kang, Zhang Hui *et al.*. Influence of deposition temperature on growth orientation of PZT/LAST thin film [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1384~1387
- 朱杰, 谢康, 张辉等. 脉冲激光沉积技术沉积温度对PZT/LAST薄膜生长取向的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1384~1387
- 27 Luo Hao, Zheng Xuejun, Zhou Yichun. Preparation of ferroelectric PZT thin films by pulsed laser deposition and the dependence of substrate temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 570~572
- 罗皓, 郑学军, 周益春. 脉冲激光沉积法制备PZT铁电薄膜及衬底温度对膜的影响 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 570~572
- 28 P. X. Zhang, W. K. Lee, G. Y. Zhang. Time dependence of laser-induced thermoelectric voltage in $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(21): 4026~4028
- 29 Cui Wendong, Zhang Hui, Zhang Guoyong *et al.*. Laser induced thermoelectric voltage of atomic laser thermopile materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 130~134
- 崔文东, 张辉, 张国勇等. 原子层热电堆材料的激光感生热电电压 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 130~134
- 30 Zou Ping, Li Zhidong, Zhang Hui *et al.*. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{O}_8$ thermoelectric thin films prepared by pulsed Laser deposition and study on laser induced thermoelectric voltage effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2154~2157
- 邹平, 李智东, 张辉等. 脉冲激光沉积法制备 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Co}_2\text{O}_8$ 热电薄膜及其激光感生的热电电压效应 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2154~2157
- 31 Hu Juntao, Li Hongshan, Zhu Jie *et al.*. Method of measuring anisotropy Seebeck coefficient of thin film based on laser induced thermoelectric voltage effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1214~1217
- 胡俊涛, 李洪山, 朱杰等. 利用激光感生热电电压效应测量薄膜的各向异性泽贝克系数 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1214~1217