

硅基(Pb,La)(Zr,Ti)O₃反铁电厚膜的制备及介电性能

耿文平, 丑修建, 吕勇博, 关新锋, 张文栋

(中北大学 电子与计算机科学技术学院 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 采用溶胶-凝胶工艺制备了具有高度(100)择优取向的(Pb,La)(Zr,Ti)O₃反铁电厚膜(厚约2.2 μm)。研究了该反铁电厚膜在不同温度下的电场诱导相变效应和不同电场强度下的温度诱导相变效应。结果表明:(Pb,La)(Zr,Ti)O₃反铁电厚膜在室温下处于反铁电态;随着温度升高,厚膜的相变开关电场强度逐渐降低,反铁电态越来越不稳定,当温度高于132 °C且电场强度为0 kV/cm时,厚膜处于顺电态;随着外加电场强度的增大,厚膜的AFE(反铁电态)-FE(铁电态)相变温度向低温方向漂移,当电场强度大于164 kV/cm时,厚膜在室温下已处于铁电态。

关键词: 溶胶-凝胶法;反铁电厚膜;介电性能;相变效应

中图分类号:TB34 文献标识码:A 文章编号:1001-2028(2012)03-0035-05

Preparation and dielectric properties of (Pb,La)(Zr,Ti)O₃ antiferroelectric thick films on silicon substrates

GENG Wenping, CHOU Xiujian, LÜ Yongbo, GUAN Xinfeng, ZHANG Wendong

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, School of Electronics and Computer Science & Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: (Pb,La)(Zr,Ti)O₃ antiferroelectric thick films (about 2.2 μm thick) showing strong (100)-orientation preference were prepared on silicon substrates by sol-gel method. The electric-field-induced phase transition and the temperature-induced phase transition behaviors of the thick films were studied under different temperatures and different electric fields, respectively. The results show that the (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick films are antiferroelectric (AFE) at room temperature. With the increase in temperature, the critical electric field strength for phase transition of the thick films decreases gradually, while the AFE state of the thick films becomes more and more unstable. When the temperature is above 132 °C and the electric field strength is 0 kV/cm, the thick films are paraelectric. With the increase of electric field strength, the critical temperature for the AFE-FE phase transition of the thick films shifts to lower value. When the electric field strength is above 164 kV/cm, the thick films are ferroelectric at room temperature.

Key words: sol-gel method; antiferroelectric thick film; dielectric properties; phase transition

随着对功能材料研究的不断深入,结构和物理性能优异的新型功能材料不断成熟,为新型功能效应的器件研发开辟了新的思路和更广的应用领域。反铁电材料作为一种新型功能材料在反铁电态(AFE)转变为铁电态(FE)的相界附近,具有丰富的结构相和奇异的相变行为。在外场(电场、温度场及应力场)作用下,反铁电材料可以被诱导产生AFE-FE相变,同时伴随着材料体积的变化,从而引起材料的场致相变应变效应。反铁电材料的这种

场致相变应变效应所产生的应变变量可达0.8%以上,在很大程度上优于压电材料的逆压电效应(0.1%左右),且相变时间极短(10⁻⁷s量级),其是一种优越的新型机敏智能材料,在微执行器方面存在着潜在的应用前景,受到众多研究学者的格外青睐^[1-2]。

反铁电厚膜材料的制备方法与工艺过程对其结构和性能有着十分重要的影响,通过选择合适的制备方法和优化工艺流程得到组分均匀、结晶完全、致密、低粗糙度及性能优异的反铁电厚膜是当前反

收稿日期:2011-12-31 通讯作者:丑修建

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51175483);山西省基础研究计划资助项目(No.20100210023-6)

作者简介:丑修建(1979-),男,湖北咸宁人,副教授,博士,主要从事电子信息功能材料与器件研究, E-mail: chouxujian@nuc.edu.cn ;

耿文平(1985-),男,山西阳泉人,研究生,研究方向为功能材料与器件, E-mail: wenpinggeng@yahoo.com.cn。

网络出版时间:2012-02-24 10:41

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1241.TN.20120224.1041.005.html>

铁电材料研究的一个重要课题。目前, 由于受铅基材料的易挥发性及毒性的影响, 锆钛酸铅基反铁电材料的制备方法主要有三种: 脉冲激光淀积 (PLD) 法^[3-4]、溅射法 (sputtering)^[5-6] 和溶胶-凝胶 (sol-gel) 法^[7-8], 其中脉冲激光淀积法制备的薄膜虽生长速率快、生长温度低, 但均匀性极差, 导致其介质损耗较大; 溅射法得到的薄膜虽结晶性好, 与集成工艺兼容, 但是膜生长速率低, 且成分与靶材存在一定的偏差; 溶胶-凝胶法具有设备简单、易操作, 组分精确可控, 易于掺杂改性, 成膜面积大, 成膜均匀, 工艺过程温度低、简单, 成本低且与 MEMS (微型机械电子系统) 工艺相兼容等优点, 是当前最常用的制备反铁电厚膜材料的方法^[9]。

笔者采用溶胶-凝胶方法, 利用分段热处理工艺, 实现了均匀、稳定的(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 溶胶的合成和(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 反铁电厚膜与硅基底的异质集成, 从而制备出了具有单一钙钛矿结构、颗粒均匀致密的硅基(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 反铁电厚膜, 并研究了该材料在不同温度下的电场诱导相变效应和不同电场强度下的温度诱导相变效应。

1 实验过程

1.1 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 前驱体溶胶的合成

(Pb_{0.97}, La_{0.02})(Zr_{0.95}, Ti_{0.05})O₃ 前驱体溶胶以三水合乙酸铅 (Pb(CH₃COO)₂ · 3H₂O, 99.9%, 分析纯)、乙酸镧 (La(CHCOO)₃, 99.9%, 分析纯)、丙醇锆 (Zr(OC₃H₇)₄, 70.0%, 分析纯) 和异丙醇钛 (Ti[OCH(CH₃)₂]₄, 97.0%, 分析纯) 为原料, 以乙酸 (CH₃COOH, 99.5%, 分析纯) 为溶剂, 乳酸 (CH₃CHOHCOOH, 85.0%, 分析纯) 为稳定剂及乙二醇 (CH₂OHCH₂OH, 99.0%, 分析纯) 为干燥控制剂。(Pb_{0.97}, La_{0.02})(Zr_{0.95}, Ti_{0.05})O₃ 前驱体溶胶的配制流程如图 1 所示^[10]。

按照工艺流程图 1 所示, 先将物质的量过量 20% 的三水合乙酸铅 (以弥补(Pb_{0.97}, La_{0.02})(Zr_{0.95}, Ti_{0.05})O₃ 前驱体溶胶在配制过程和(Pb_{0.97}, La_{0.02})(Zr_{0.95}, Ti_{0.05})O₃ 反铁电厚膜在热处理过程中铅的挥发) 和乙酸镧按照 117:2 的摩尔比溶于乙酸中并加热至 90 °C 搅拌 30 min, 冷却至室温得到含铅、镧的前驱体溶液。按物质的量之比为 19:1 称取适量的丙醇锆和异丙醇钛溶于配制好的铅、镧前驱体溶液中, 同时加入适量的去离子水于室温下搅拌 30 min。而后依次加入乳酸、乙二醇并搅拌 30 min, 最后加入乙酸稀释至 0.4 mol/L。静置陈化 24 h 后得到(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 溶胶。PbO 溶胶的配制类似于(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 溶胶的配制,

称取适量的三水合乙酸铅溶于乙酸中并加热至 90 °C 搅拌使其充分溶解, 待冷却至室温后加入乙酸调整其摩尔浓度为 0.4 mol/L。

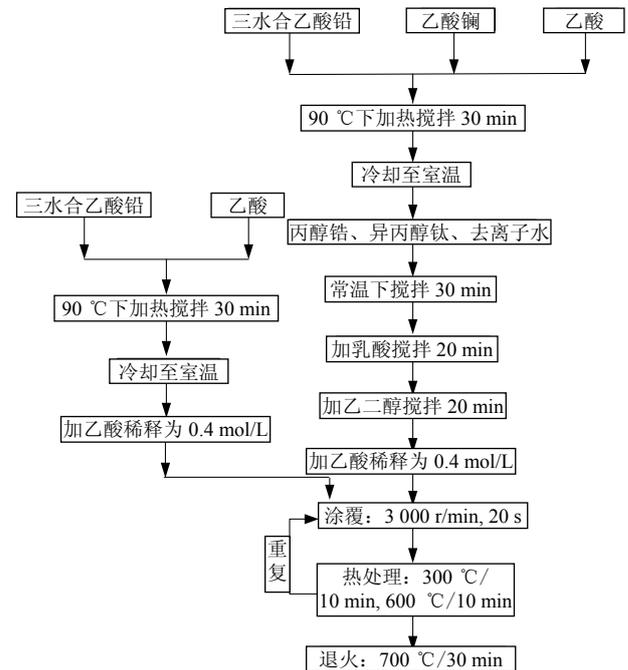


图 1 溶胶-凝胶法制备(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 反铁电厚膜的工艺流程图
Fig.1 Flow diagram of sol-gel processing for preparation of (Pb,La)(Zr,Ti)O₃ antiferroelectric thick films

1.2 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜的制备

用陈化后的前驱体溶胶, 通过匀胶工艺和热处理工艺制备(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 反铁电厚膜。其具体过程为: 将陈化后的前驱体溶胶过滤后滴加在依次用去离子水、丙酮、去离子水和酒精超声清洗过的 Pt(111)/Ti/SiO₂/Si(100) 上, 匀胶机转速为 3 000 r/min, 匀胶时间为 20 s。匀胶后的湿膜在 300 和 600 °C 下分段热处理各 10 min 后得到一层(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 薄膜, 该薄膜的厚度由前驱体溶胶的摩尔浓度、匀胶机的转速和涂胶时间共同决定。将上述涂胶和热处理工艺重复多次, 直至达到所需厚度。最后在(Pb,La)(Zr,Ti)O₃ 反铁电厚膜上涂覆一层 PbO 溶胶后在 700 °C 退火 30 min (如图 1 所示)。整个热处理工艺流程在空气氛围中进行。

1.3 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜的性能测试

采用德国 Bruker 公司的 D8 Advanced X 射线衍射仪 (XRD) 分析反铁电厚膜的晶相结构, 用本原公司的 CSPM-5500 原子力显微镜 (AFM) 和日本电子株式会社的 JSM EMP-800 型扫描电镜 (SEM) 分别观察反铁电厚膜表面形貌和界面形貌。用掩模法通过直流溅射制备 Au 上电极, 其厚约为 200 nm, 直径为 0.5 mm, 为了增加 Au 电极在厚膜表面的附着力, 将带有 Au 上电极的厚膜在 200 °C 热处理 20 min。采用由计算机控制的 Agilent 4284A 高精度阻抗

(LCR) 分析仪分别测试在不同温度下反铁电厚膜的相对介电常数(ϵ_r)和介质损耗($\tan\delta$)随电场变化($C-E$)的曲线和在不同电压下反铁电厚膜的 ϵ_r 随温度变化($C-t$)的曲线。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

生长在 Pt(111)/TiO₂/SiO₂/Si(100) 基片上 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜的 XRD 谱 (扫描角度为 20°~60°, 扫描速度为 6 °/min), 结果如图 2 所示。

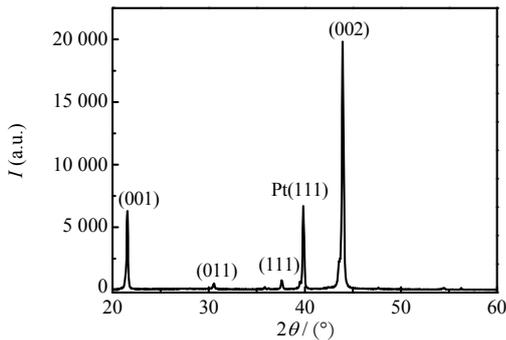


图 2 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜的 XRD 谱
Fig.2 XRD pattern of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick film

从图 2 可以看出得到, (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 厚膜均为四方钙钛矿相结构, 无其他杂相生成 (如焦绿石相), 且呈现出很高的 (100) 晶面取向生长, 根据公式:

$$t = I_{(100)} / [I_{(100)} + I_{(110)} + I_{(111)}] \quad (1)$$

该晶面的取向度 t 约为 0.875 (其中 I 表示各晶面的衍射强度), 这是由于 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 溶胶体系中铅含量较高所致。当胶体中乙酸铅的物质的量过量 15%~20% 时, (100) 晶面取向的 PbO 首先在基片上结晶, 然后诱导目标薄膜沿该方向生长^[11]。为了防止厚膜在晶化过程中由于铅的大量挥发而形成焦绿石相, 需在厚膜表面涂覆一层 PbO 溶胶后再进行退火^[12]。

2.2 形貌分析

反铁电厚膜的表面形貌和晶粒生长状况是影响其介电性能的主要因素。一般而言, 性能优良的厚膜表面光滑、平整度好且致密度高。(Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜的表面形貌是在室温下通过 AFM 测试得到的 (如图 3 所示), 扫描范围为 20 μm×20 μm。

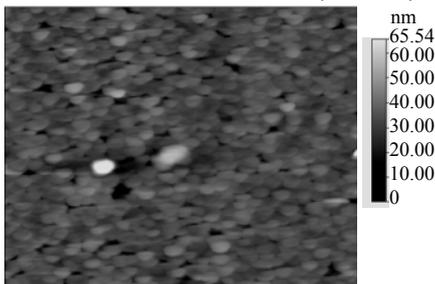


图 3 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜的 AFM 照片
Fig.3 AFM photo of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick film

从图 3 中可以看出, (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜结晶良好, 晶粒发育均匀, 表面平整 (表面粗糙度为 4.97 nm)。从图 4 可以看出 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜与基底界面清晰, 结构致密且厚度约为 2.2 μm。

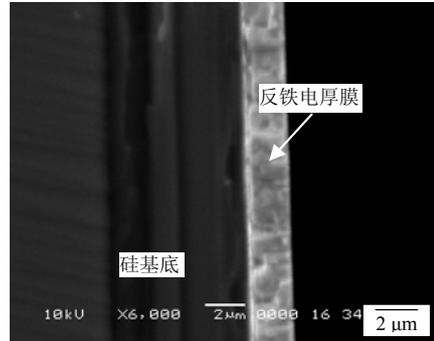


图 4 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜断面的 SEM 照片
Fig.4 Cross-section (SEM) image of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick film

2.3 不同温度下的 $C-E$ 曲线分析

图 5 给出了不同温度下 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜的 ϵ_r 和 $\tan\delta$ 在外加直流电场作用下的变化曲线 ($C-E$), 加压方式为 $0 \rightarrow E_{\max} \rightarrow -E_{\max} \rightarrow 0$, 测试频率为 100 kHz。同铁电材料的“单蝴蝶” $C-E$ 曲线相比, 反铁电材料的 $C-E$ 曲线表现为“双蝴蝶”状。其相变电场强度可由曲线中的介电常数峰值所对应的电场强度得到。

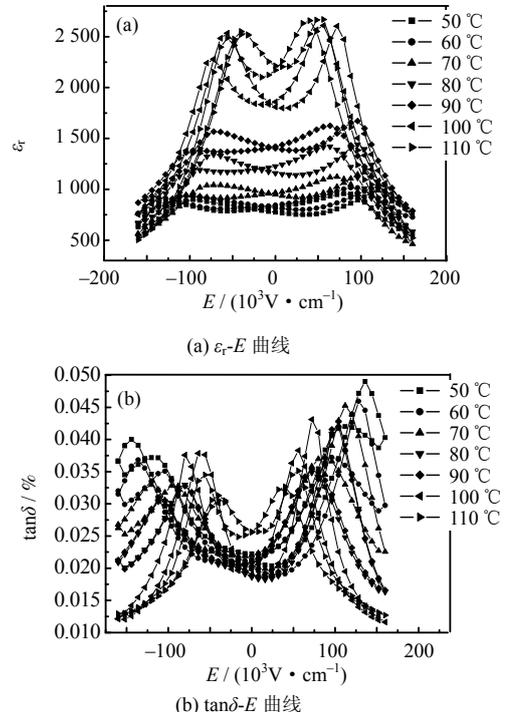


图 5 不同温度下 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ 反铁电厚膜在外加直流电场作用下的 $C-E$ 曲线
Fig.5 The $C-E$ curves of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick film at different temperatures under DC field

从图 5 中可见反铁电态与铁电态在直流电场诱导作用下相互转变过程。当外加电场小于临界电场强度 E_{AFE-FE} (即正向开关电场强度) 时, 厚膜处于

反铁电态, 介电常数及介质损耗随电场的增大而增大; 当外加电场强度超过 $E_{AFE \rightarrow FE}$, 厚膜由反铁电态诱导为铁电态, 这是因为在电场强度作用下, 相邻子晶格发生反转, 由反向平行排列转换为同向平行排列, 此时介电常数及介质损耗陡然下降。而当电场强度减小并小于临界电场强度 $E_{FE \rightarrow AFE}$ (即逆向开关电场强度) 时, 厚膜重新回到反铁电态, 介电常数恢复到初始值。相变临界参数正向开关电场强度 $E_{AFE \rightarrow FE}$ 反映了(Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜被诱导为反铁电态的难易程度, 逆向开关电场强度 $E_{FE \rightarrow AFE}$ 反映了该厚膜恢复到铁电态的难易程度; 电滞宽度 ΔE 反映了厚膜反铁电态的稳定程度, 其值越大越稳定。如表 1 所示, 随着温度的增加, 正向开关电场强度 $E_{AFE \rightarrow FE}$ 与逆向开关电场强度 $E_{FE \rightarrow AFE}$ 均逐渐降低, 电滞宽度 ΔE 逐渐减小。厚膜的反铁电态越来越不稳定, 易被诱导为铁电态。

表 1 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜在不同温度下的电场诱导相变参数
Tab.1 Electric-field-induced phase transition parameters of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick film at various temperatures

$t/^\circ\text{C}$	ϵ_r	$\tan\delta/\%$	$E_{AFE \rightarrow FE} / (10^3 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$	$E_{FE \rightarrow AFE} / (10^3 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\Delta E / (10^3 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$
50	774	2.13	128	88	40
60	817	2.00	118	82	36
70	94	2.05	104	72	32
80	1159	1.86	94	65	29
90	1402	1.89	88	63	25
100	1808	1.88	72	56	16
110	2213	2.56	55	42	13

2.4 不同电压下 $C-t$ 曲线分析

(Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜在不同电压下的 $C-t$ 曲线如图 6 所示, 测试频率为 1 kHz。同铁电材料一样, 在温度变化时反铁电材料也遵守居里-外斯

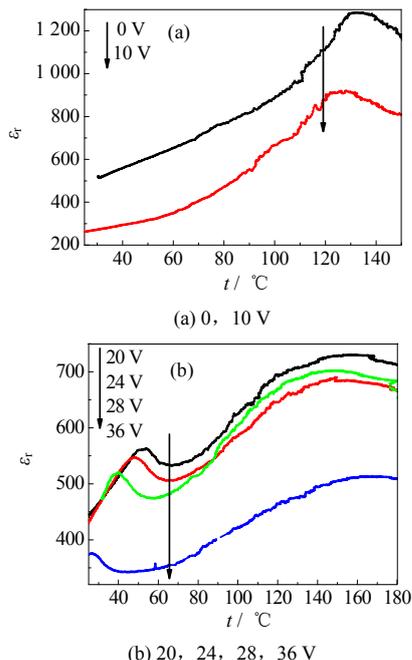


图 6 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜在不同电压下的 $C-t$ 曲线
Fig.6 The $C-t$ curves of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick film at different voltages

定律。在室温到居里温度之间, 温度的变化会导致反铁电材料发生结构相变, 进而引起材料宏观性能 (如极化强度、介电常数、相变电流及应变等) 发生明显的改变。当温度场与电场及应力场共同作用时, 反铁电材料的相变过程将变得更为复杂。

如图 6 所示, 在外加电压为 0 (电场强度为 0) 时, (Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜随着温度的升高发生了 AFE-FE-PE (顺电态) 相变, 由于铁电态极其短暂, 因此只能观察到一个弥散的相变峰, 且当温度高于 132 °C 时 (如表 2 所示), 厚膜处于顺电态; 随着外加电场的增大, 该相变峰更加弥散, 这是因为 AFE-FE 和 FE-PE 相变的叠加效应及铁电态范围增大。当电场大到一定值时, AFE-FE 和 FE-PE 相变成为单独的两个相变峰且随着外加电场强度的继续增大, AFE-FE 相变温度向低温方向漂移而 FE-PE 相变温度向高温方向漂移。如表 2 所示, 当电压大于 36 V (电场强度大于 $164 \times 10^3 \text{V/cm}$) 时, (Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜在室温下为诱导铁电态, 随着温度的升高, 发生 FE-PE 相变, 相变温度高于无外场时所得的居里温度, 且相变峰更加弥散。这是由于厚膜与基底的界面应力或其他形式的微小变化所导致的^[13]。

表 2 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜在不同电压下的温度诱导相变参数
Tab.2 Temperature-induced phase transition parameters of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ antiferroelectric thick film at various voltages

U/V	$E / (10^3 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$	AFE-FE 相变温度/ $^\circ\text{C}$	FE-PE 相变温度/ $^\circ\text{C}$
0	0	132	132
10	45	126	126
20	91	54	142
24	109	48	143
28	127	40	149
36	164	28	167

3 结论

(1) 采用溶胶-凝胶工艺, 以三水合乙酸铅、乙酸镧、丙醇锆和异丙醇钛为原料, 制备了无裂纹, 致密性好, 晶粒分布均匀且粗糙度低 (约 4.97 nm) 的高度 (100) 晶面择优取向的单一钙钛矿结构的 (Pb, La)(Zr, Ti)O₃反铁电厚膜。

(2) 在不同温度下的电场诱导相变中, 随着温度的升高, 材料的反铁电性越来越不稳定, 其易被电场诱导为铁电态。

(3) 在不同电场强度下的温度诱导相变中, 随着电场强度增加, AFE-FE 与 FE-PE 相变温度差逐渐增大且 AFE-FE 相变温度向低温方向漂移, 当其大于正向开关电场强度 $E_{AFE \rightarrow FE}$, 厚膜仅发生 FE-PE 相变。

参考文献:

- [1] XU B M, PAI N G, WANG Q M, et al. Antiferroelectric thin and thick films for high-strain micro-actuators [J]. Integr Ferroelectr, 1998, 22: 545-557.

- [2] BROOKS K G, CHEN J, UDAYAKUMAR K R, et al. Electric field forced phase switching in La-modified lead zirconate titanate stannate thin films [J]. *J Appl Phys*, 1998, 75(3): 1698-704.
- [3] TANG Z F, TANG X G. Structural, dielectric and optical properties of highly oriented lead zirconate thin films prepared by sol-gel process [J]. *Mater Chem Phys*, 2003, 80(1): 294-298.
- [4] ZHAI J W, LI X, CHEN H. Effect of the orientation on the ferroelectric-antiferroelectric behavior of sol-gel deposited (Pb,Nb)(Zr,Sn,Ti)O₃ thin films [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 446: 200-204.
- [5] YAMAKAWA K, MCKINSTRY ST, DOUGHERTY J P, et al. Reactive magnetron co-sputtered antiferroelectric lead zirconate thin films [J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(14): 2014-2016.
- [6] XU Z K, CHAN W H. Preparation and electrical properties of highly (111) oriented antiferroelectric PLZST films by radio frequency magnetron sputtering [J]. *Acta Mater*, 2007, 55(11): 3923-3928.
- [7] BHARADWAJ S S N, KRUPANIDHI S B. Alternating current electrical properties of antiferroelectric lead zirconate thin films by pulsed excimer laser ablation [J]. *J Appl Phys*, 2000, 88(4): 2072-2080.
- [8] YAO Y B, ZHAI J W, CHEN H. Dielectric properties of lead lanthanum zirconate titanate antiferroelectric thin films prepared by pulsed laser deposition [J]. *J Appl Phys*, 2004, 95(11): 6341-6346.
- [9] 张丰庆, 范素华, 任艳霞, 等. SBTi 系层状铁电陶瓷材料研究现状 [J]. *中国陶瓷*, 2006, 42(4): 14-16.
- [10] 王静, 耿文平, 张亚婷, 等. 前驱体溶剂对铅基反铁电厚膜介电性能的影响 [J]. *电子元件与材料*, 2010, 29(9): 9-12.
- [11] CHEN S Y, CHEN I W. Temperature-time texture transition of Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ thin films: i. role of Pb-rich intermediate phase [J]. *J Am Ceram Soc*, 1994, 77(9): 2332-2336.
- [12] XU B M, CROSS L E, RAVICHANDRAN D. Synthesis of lead zirconate titanate stannate antiferroelectric thick films by sol-gel processing [J]. *J Am Ceram Soc*, 1999, 82(2): 306-312.
- [13] MISCHENKO A S, ZHANG Q. Giant electrocaloric effect in thin-film PbZr_{0.95}Ti_{0.05}O₃ [J]. *Science*, 2006, 311: 1270-1271.

(编辑: 邓学敏)

科学家制造出光电功能兼备的新式光纤

据美国物理学家组织网 2012 年 2 月 6 日(北京时间)报道, 英国南安普顿大学和美国宾夕法尼亚州立大学的科学家携手, 首次将半导体芯片嵌入光纤中, 制造出一种具有高速光电功能的新型光纤, 这种光纤可用于改善通讯技术和其他混合光电技术。相关研究将发表在本月出版的《自然·光子学》杂志上。

宾夕法尼亚州立大学的化学家约翰·拜丁解释道: “将光纤和芯片整合在一起很困难, 原因如下: 首先, 光纤是圆柱状的, 而芯片是平的。另外, 光纤和芯片的块头实在太小, 光纤的宽度仅为人头发丝的十分之一, 而其上建有导光通路的芯片仅为光纤的十分之一, 因此, 让这两种设备很好地排列对现有技术来说是一个巨大挑战。”

该研究团队采用了一种新奇的方法来解决上述与嵌入技术有关的问题。他们采用的方法不是将平直的芯片和圆柱状的光纤直接合并在一起, 而是使用他们自己的集成电子元件, 不需要将光纤直接整合在芯片上, 而是使用高压化学技术将半导体材料一层一层直接沉积在光纤的微孔内, 制造出新型光纤。

南安普敦大学光电研究中心的高级研究员皮尔·萨齐奥表示: “我们的最大突破在于, 我们不需要将整个芯片作为最终完成产品的一部分, 制造传统芯片需要耗资数百万美元的无尘室设施, 而我们的过程能使用成本更少的简单设备来完成。我们也在光纤内设法制造出了结点, 让所有的电子行为发生在此活动边界内, 确保了新产品拥有非常高的光电性能。”

南安普敦大学光电研究中心的安娜·皮科尔补充道: “对于未来的通讯网络来说, 将光电设备的功能整合入光纤内是一个重要的技术进步。在这种意义上, 或许在未来, 我们可以借此获得更快、更廉价、更高效的系统。而且, 最新研究代表了一种全新的建构半导体结点的方法, 因此, 也有可能应用于很多非通讯领域。”

南安普敦大学光电研究中心的博士后研究生诺尔·希立得出结论说: “在光纤内演示复杂的光电工程技术是一件令人兴奋的事情, 因为它有潜力成为一种关键技术, 让速度更快、成本更低、能效更高的通讯网络成为可能。”

(摘自中科院网站)