

重温 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ 铁电薄膜极化疲劳问题*

刘俊明^{1,2,†} 王阳^{1,2}

(1 南京大学物理系 固体微结构物理国家实验室 南京 210093)

(2 中国科学院国际材料物理研究中心 沈阳 110016)

摘要 具有 ABO_3 型钙钛矿结构的 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT) 展示出良好的铁电极化性能, 是使用最广的铁电材料。然而, 在将它应用于铁电存储时, PZT 薄膜遭遇到极化疲劳问题而被 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) 等铁电体所替代, 这一问题至今未能得到妥善解决。文章首先通过变温极化疲劳实验充分理解 PZT 极化疲劳的基本过程, 然后有针对性地进行材料设计, 获得基本无极化疲劳的 PZT 铁电薄膜。

关键词 PZT 铁电薄膜 极化疲劳 缺陷 长程迁移

Polarization fatigue of ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ thin films revisited

LIU Jun-Ming^{1,2,†} WANG Yang^{1,2}

(1 Department of Physics and Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(2 International Center for Materials Physics, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract Perovskite $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT) represents one of the most extensively utilized ferroelectrics, in spite of its lead contamination. However, its application in ferroelectric random access memories (FeRAMs) has been hindered due to serious polarization fatigue upon repeated domain switching, so that it has eventually been replaced by layered perovskite ferroelectric $\text{Sr}_2\text{BiTa}_5\text{O}_9$ (SBT), among others. Since polarization fatigue remains an unsolved physical issue we address this problem by a comprehensive approach in which the associated mechanisms are investigated by fatigue testing at different temperatures, amplitudes and frequencies of the electric field. As a result, we have developed a novel strategy by which the fatigue of PZT thin films deposited on Pt-coated Si wafers can be essentially suppressed.

Keywords PZT thin films, polarization fatigue, charged defects, long-range migration

1 引言

铁电薄膜作为非挥发存储记录介质 (FeRAMs) 其研究和应用开发经历了 1990 年代差不多十年的热潮, 到今天以在低端存储记录器件中获得规模应用而收场^[1-3]。信息技术产业将主要目标转向更有竞争潜力的非挥发存储介质, 如自旋阀磁随机存储器 (MRAMs)。同一时期, 对铁电薄膜的研究, 宣告使用最为广泛和铁电性能最优越的 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT) 无法应用于 FeRAMs。其原因有

两个: 一是 PZT 薄膜极化疲劳行为严重, 相关基础研究始终未能解决这一问题^[4-6]; 二是 PZT 体系含铅, 因而以环境污染之名正在被逐步淘汰。

这里的极化疲劳特指沉积在以 Pt 为电极材料的 Si 基片上的 PZT 薄膜极化疲劳。无论 PZT 在铁电压电等应用中将置于何地, 其极化疲劳作为一个基础物理问题仍然是值得研究的。因此, 本文的研究

* 国家自然科学基金(批准号:10474039, 50332020)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2002CB613303)资助项目
2007-12-18 收到初稿 2008-01-14 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: liujm@nju.edu.cn

对象是一个已经很少有人问津的课题. 开展这一研究的价值基于两点 (1) 这毕竟是一个未解决的科学问题 (2) 这一问题的解决对于那些与 PZT 结构相同但是不含 Pb 的其他潜在铁电材料付诸应用有一定参考价值.

本文首先概述铁电薄膜疲劳研究的一些基本知识, 接着介绍我们研究的思路 and 结果. 随后提出我们设计的室温无疲劳 PZT 铁电薄膜材料, 最后我们给出一个简短结论.

2 PZT 铁电薄膜研究概述

处于准同型相界(MPB)的PZT自发极化可达 $60\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 压电和介电性能都很优异, 是综合性能最佳的铁电体, 已经付诸换能和传感应用数十年. 但是其铁电疲劳行为极其严重. 所谓极化疲劳, 是指铁电薄膜在交变外电场驱动下反复进行极化(畴)翻转时其自发极化 P (特别是剩余极化 P_r)不断丧失的过程. 图1(来自文献[7])给出了极化疲劳的基本特征:

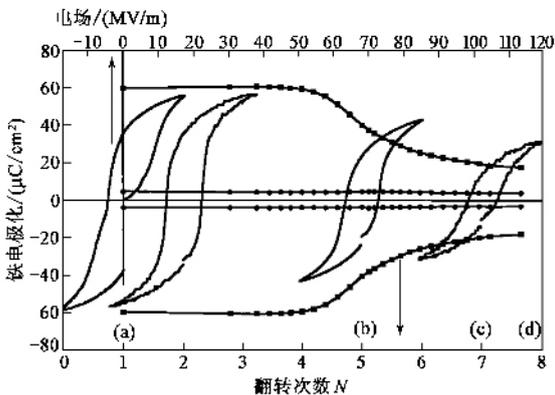


图1 铁电薄膜极化疲劳示意图(横轴代表交变外场周期变化次数 N (对数标度)纵轴代表疲劳实验下的铁电极化, 结果表示铁电回线随 N 增大而不断萎缩^[7]。(a)(b)(c)(d)标注出铁电疲劳曲线的4个不同状态

极化翻转导致的疲劳使得铁电存储记忆变得困难, 严重疲劳时不再有表现的自发极化, 因此通过正、负极化存储的信息将完全丢失. 前人从微观和唯象等多种角度阐述了铁电疲劳的基本原因, 其微观物理是铁电畴在外场驱动翻转过程中被钉扎. 这种钉扎在很大程度上归因于带电缺陷(如氧空位、电子/空穴等)在畴壁处聚集. 我们将主要的理论观点归纳一下, 主要有下面4种说法:

(1) 外场驱动下的畴翻转是一级相变, 反向

畴成核被聚集的电荷缺陷抑制, 导致成核困难而难以完成畴翻转^[8,9].

(2) 外场驱动下完成反向畴成核, 但是反向畴畴壁在扩展过程中被电荷缺陷钉扎无法有效移动, 导致畴翻转难以完成^[10,11].

(3) 在外场驱动下, 外加电荷(主要是电子/空穴)从电极注入到薄膜中, 钉扎住铁电畴, 遏制其翻转^[12,13]. 这一机制在简单金属做电极材料时可能会起一定作用, 也有一些证据证明其的确起作用. 通过测量薄膜疲劳前后漏电流的大小可以间接判断这一机制的强弱.

(4) 在外场作用下, 电荷缺陷(如氧空位)在薄膜内部长程迁移, 最后聚集在电极/薄膜界面附近薄膜一侧^[14]. 由于这一聚集层是介电常数很低的所谓“死层”, 施加在薄膜上的电场几乎全部消耗在这一死层中, 薄膜内部的电场变得很小, 不足以翻转铁电畴.

还有一些其他的机制也会导致铁电畴钉扎, 但是这些机制大致可以归纳入上述四种之一. 我们特别青睐第四种机制. 除开第三种机制之外, 其他机制大致可以纳入图2所示的图像:

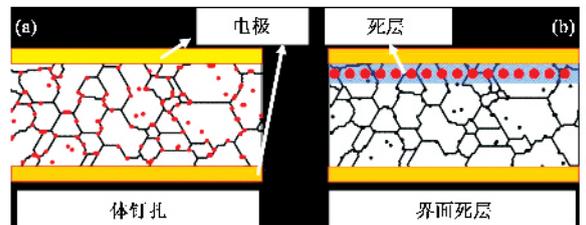


图2 上下电极夹持的多畴铁电薄膜 (a)体钉扎模式: 位于畴壁的小圆点示意性地表示电荷缺陷(氧空位) (b)界面钉扎模式: 阴影区域为缺陷聚集的“死层”(放大以清楚计), 其中大圆点表示聚集的电荷缺陷

图2为两种基本畴钉扎模式. 图2(a)中, 极化翻转使得电荷缺陷主要聚集在薄膜内部畴壁中, 从而局域地钉扎畴壁, 导致疲劳, 称之为体钉扎模式; 图2(b)中, 极化翻转导致薄膜缺陷长程迁移到薄膜/电极界面, 形成“死层”, 从而导致疲劳, 称之为界面钉扎模式. 2000年, Dawber和Scott针对氧空位长程迁移机制提出了一个模型(DS模型), 其最后结果可用下式表示^[14]:

$$R(N) = A \cdot \exp\left[-6\lambda \cdot \mu \cdot \varepsilon_s^{-1} e \cdot \exp\left(\frac{3a}{2} E_A\right) \frac{N}{f}\right] + B, \quad (1)$$

式中 P 为剩余极化大小, N 为极化翻转次数, A , B 和 a 为与材料体系相关的常数, $\lambda = n \cdot \exp(-\Delta S/k)$, n

为缺陷浓度 ΔS 为缺陷运动导致的系统熵变, 可视为常数 μ 为电荷缺陷迁移率, 与温度 T 和缺陷迁移激活能 U 的关系为 $\mu \sim \exp(-U/kT)$, ϵ_s 为薄膜介电常数 e 为电子电荷, E_A 可以视为施加的电场大小 f 为外电场变化频率。

与实验对比发现, DS 模型不具有定量的价值, 但是定性上能够告诉我们几个外部可控因素对极化疲劳的影响。换句话说, 通过研究这几个可控因素的影响, 我们可以由 DS 模型来判别电荷缺陷长程迁移对极化疲劳的影响是否占主导地位。这几个可控因素是: 缺陷浓度 n 、温度 T 、激活能 U 、外场强度 E_A 和外场频率 f 。对于体钉扎模式, T 越低, E_A 越小 f 越高, 畴壁被钉扎的可能性就越大, 从而越容易导致疲劳; 相反, 对于界面钉扎模式, T 越高, E_A 越大 f 越低, 畴壁被钉扎的可能性就越大, 从而越容易导致疲劳。可控因素对疲劳影响的绝然不同使得我们有机会澄清到底是哪种钉扎模式占主导地位。有针对性地设计实验, 从而揭示出在 PZT 铁电薄膜疲劳中占主导的是缺陷的长程迁移。

3 实验设计与步骤

在图 2 所示的两种模式中, 体钉扎模式要充分表现出来的条件之一是极化翻转模式数目尽可能地少。原因在于局域畴壁钉扎处的缺陷浓度不可能很高, 如果存在很多极化翻转模式, 那么体钉扎效应就不可能很明显。为了避免这一问题, 我们不仅要有意识地选择铁电性能最优的 PZT ($x = 0.52$) 体系, 也要选择 $x = 0.1$ 的体系, 因为前者处在 MPB 处^[5], 至少有 8 个翻转模式, 而后者是四方相, 最多只有 4 个翻转模式。这样的实验设计可以在 $x = 0.1$ 的体系中尽可能地提升体钉扎模式的效应。

另一方面, 引入温度效应也是本研究特色。通过研究不同温度下的铁电疲劳效应, 可以更充分地了解其内在的物理: 高温有利于体钉扎畴壁的释放, 从而抑制疲劳; 但高温也有利于缺陷长程扩散, 从而有利于界面钉扎形成, 恶化疲劳。因此不同温度下的疲劳实验可以抑扬两种钉扎模式的竞争。同理, 改变外场 E_A 和频率 f 的大小, 也能够抑扬两者之间的竞争, 从而更加有利于揭示出哪种模式在 PZT 疲劳中占主导地位。

实验工作利用传统溶胶-凝胶方法在 Pt/Ti/(100)Si 基片上制备 PZT 薄膜, 具体制备过程可参阅文献 [15]。利用 X 射线衍射技术和电镜技术, 可

以证明薄膜具有良好的结晶质量和多晶取向, 薄膜铁电性能优良, 介电常数 ϵ_r 约等于 600, 与前人报道结果类似, 介电损耗 $\tan\delta$ 值小于 0.02, 膜的厚度在 320—400nm 之间。极化疲劳实验在标准的 RT66A 铁电测试仪上进行, 外场频率为 1 kHz 和 50 kHz。1.0 MHz 的疲劳数据不可信。薄膜样品置于温度严格可控(温度误差 0.1 K)的 JANIS 氦压缩制冷工作台内, 样品温度在 10 K 到 300 K 之间变化。

4 实验结果与分析

4.1 铁电行为

首先观测一下 $x = 0.1$ 的 PZT 薄膜铁电行为。图 3(a) 为不同温度 T 下薄膜电滞回线, 可以看到, 在给定外场强度 E_A 下, 随 T 下降, 铁电极化明显下降, 而矫顽场显著增大。对 $x = 0.52$ 样品, 实验则揭示不同 T 下的回线几乎相同。这说明 $x = 0.52$ 时, 可翻转极化模式的确很多, 即便在低 T 下也有足够的激活翻转模式; 而在 $x = 0.1$ 时, 本来就较少的翻转模式在低 T 下被有效冻结。为了使 $x = 0.1$ 时不同 T 下的疲劳实验具有可比性, 必须保证激活的畴翻转模式数目不变, 也就是说, T 越低时进行疲劳实验的 E_A 应该越高, 以保证基本相同的畴翻转动力学。我们尝试了保持 E_A 与矫顽场 E_c 之比不变的实验, 图 3(b) 为实验结果, 显示出不同 T 下 $E_A/E_c = 2.5$ 时约化坐标中测得的回线几乎重合。因此, 只要保证 E_A/E_c 不变的条件, 任何温度下的极化疲劳实验结果都具有可比性。

4.2 温度行为

首先看 $x = 0.1$ 时不同温度 T 下的疲劳实验结果, 如图 4(a) 所示(图中实线为 DS 模型的拟合结果, 可见 DS 模型不具有定量可靠性, 而定性描述是合理的), 此时外场强度 $E_A = 188$ kV/cm 保持不变。这里极化是铁电薄膜的剩余极化大小, 我们用约化的极化/初始极化来表征极化翻转 N 次后的大小。很明显, 温度越低, 疲劳效应越弱。这一结果与体钉扎疲劳模式完全相反, 因为在体钉扎下, T 越低, 畴壁越容易被钉扎, 而且低温下可激活的翻转模式将更少, 因此疲劳应该越严重才对。即便我们保持 $E_A/E_c = 2.5$ 不变, 结果依然如此, 如图 4(b) 所示。如果界面钉扎模式占主导, 则实验结果就非常合理, 因为 T 越低, 电荷缺陷的长程迁移在动力学上越困难, 界面死层就越难形成。

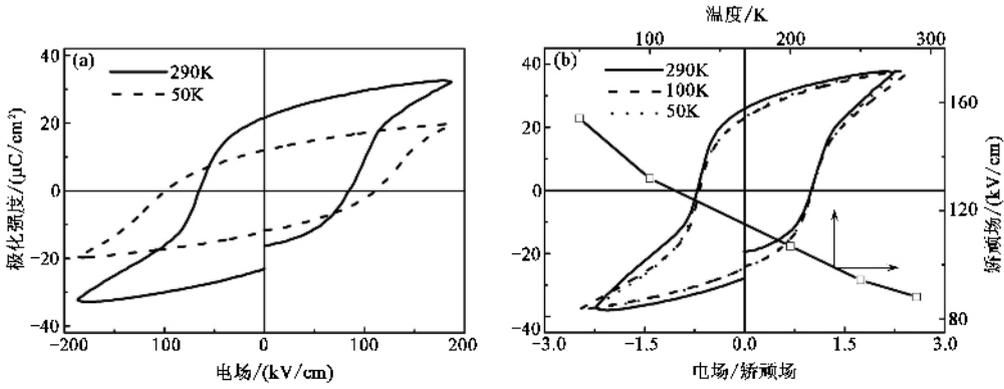


图3 PZT ($x=0.1$) 薄膜 (a) 不同温度下的极化强度-电场 ($P-E_A$) 回线 (b) 不同温度下的 $P-E_A/E_c$ 铁电回线. 矫顽场对温度的依赖关系也放在图 (b) 中^[16]

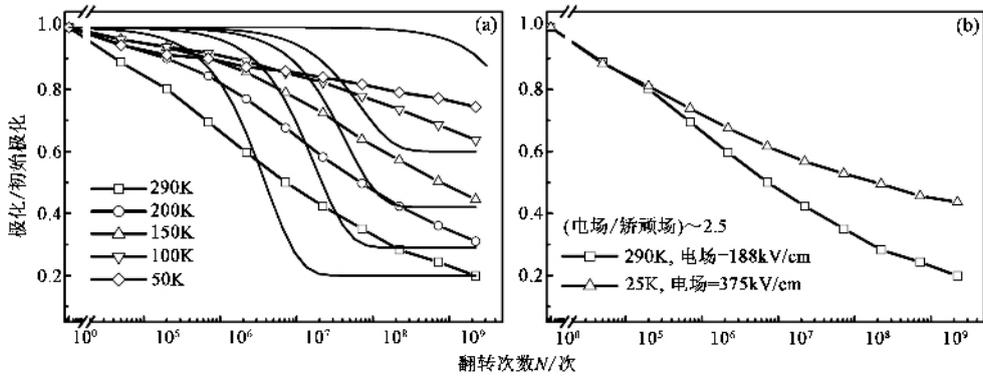


图4 PZT ($x=0.1$) 薄膜 (a) 在电场为 188kV/cm 时不同温度下的疲劳实验结果 (b) 在电场/矫顽场 = 2.5 时不同温度下的疲劳实验结果^[16]

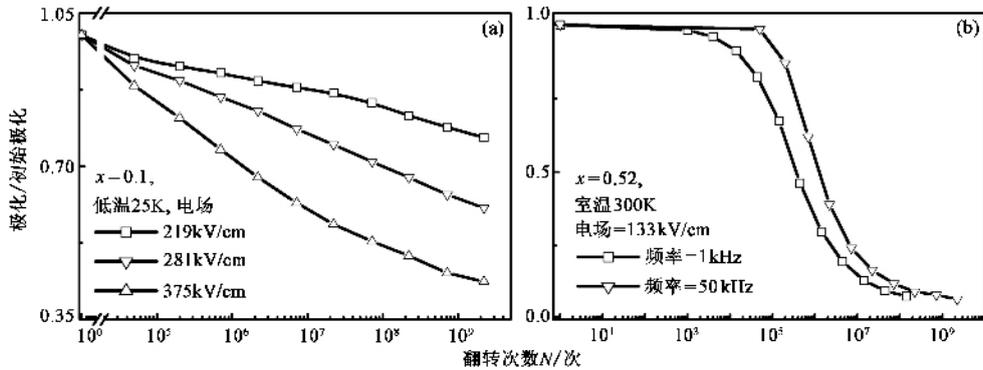


图5 (a) PZT ($x=0.1$) 薄膜在 25K 时不同外场强度下的疲劳实验结果^[16] (b) PZT ($x=0.52$) 薄膜在恒定外场强度时室温下不同频率的疲劳实验结果^[17]

进一步的实验证实是在低 T 时不同 E_A 下的疲劳实验结果, 如图 5 (a) 所示: E_A 越高, 疲劳竟然越严重, 与体钉扎模式再一次相悖, 而界面钉扎模式得到支持.

虽然 $x=0.52$ 体系因为可翻转的极化模式很多, 导致上述效应不是特别明显, 但是对 T, E_A 和 f

的依赖关系, 则与上述结果类似, 似乎全部支持界面钉扎模式. 例如, 在 $x=0.52$ 时, 不同频率 f 下的结果也支持界面钉扎模式: f 越低, 疲劳越严重, 如图 5 (b) 所示.

4.3 消除界面死层

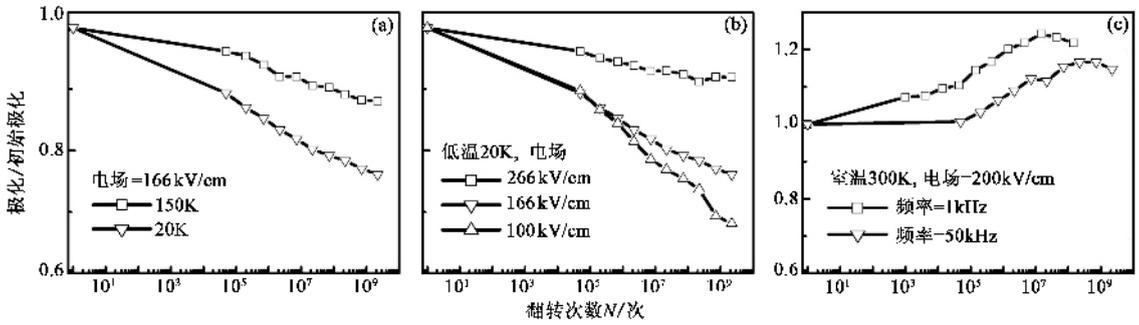


图6 PZT ($x=0.52$)薄膜在LNO作电极情况下的疲劳实验结果 (a)外场强度恒定,改变温度,频率为50kHz (b)温度恒定,改变外场强度,频率为50kHz (c)温度和场强恒定,改变频率^[17]

作为进一步支持界面钉扎模式的证据,我们还可以更换Pt电极,选择与PZT结构类似的LaNiO₃(LNO)作电极.为了使实验结果更为典型,我们集中研究了 $x=0.52$ 的样品.由于PZT/LNO界面不存在明显的肖特基势垒,电荷缺陷可以很容易通过界面进入到LNO中,从而使界面钉扎模式基本失效.这时,观测到的疲劳效应应该主要是体钉扎模式的贡献.采用类似的溶胶-凝胶工艺,我们制备了PZT铁电电容器结构,上下电极都是LNO.我们将不同温度 T 、外场强度 E_A 、频率 f 下的疲劳测试结果总结在图6中.可以看到,全部结果都是与体钉扎模式的预测相符合的. T 越低时, E_A 越低, f 越高,极化疲劳就越严重.为了证明在用LNO作电极时,界面层的确不存在,我们进行了疲劳后高场恢复(rejuvenation)实验,结果表明,使用LNO电极时,疲劳样品可以实现完全的恢复,而使用Pt电极时则无法实现疲劳后的恢复.因此,上述研究结果较充分地证明,在Pt电极情况下,PZT薄膜的极化疲劳主要是由界面钉扎模式引起的.

5 无疲劳设计与试验

既然PZT薄膜疲劳是电荷缺陷在外场作用下长程迁移到电极界面形成死层导致畴翻转失效引起的,我们有两种方法来改善PZT的抗极化疲劳性能:降低电荷缺陷浓度;减缓电荷缺陷的长程迁移.很显然,实现前者比较容易.

氧空位是PZT薄膜中的一种重要电荷缺陷.我们知道,Pb—O键键能大约为382kJ/mol,而Sr—O键能和Ba—O键能则分别为426kJ/mol和562kJ/mol^[18].况且Sr和Ba与Pb一样是碱土金属.很容易预测,在PZT中掺杂Sr或者Ba,将增强体系对O离子的键合能力,抑制氧空位的浓度.这

一思路在本研究中获得实现.

图7(a)和7(b)分别为不同Sr和Ba掺杂量 y 时的直流电导实验结果,利用极化子激活规律进行拟合:

$$\sigma T = nqD_0 \cdot \exp(-U/kT), \quad (2)$$

式中 n 为缺陷浓度, q 为电荷, D_0 为迁移率因子(常数), U 为激活能.可以看到,由归一化后对数电导 $\ln(\sigma T)$ 与温度倒数的线性关系斜率可以确定出 U ,而由截距可以确定缺陷浓度 n 的相对变化.对于所有掺杂未掺杂情况,电导-温度关系都很好地满足上述方程.我们将拟合参数列在表1中,结果显示:Ba掺杂 $y=0, 0.05, 0.1$ 时, U 几乎没有变化,而 n 却出现了明显下降,在 $y=0.1$ 时, n 值只有未掺杂时的30%左右;对于Sr掺杂 $y=0, 0.1, 0.2$ 时, U 的变化也很小,而 n 在 $y=0.2$ 时只有未掺杂时的5%.

表1 不同锶和钡掺杂下PZT的电荷缺陷浓度相对值和迁移激活能

Sr	U/eV	n	Ba	U/eV	n
$y=0.0$	1.56	100%	$y=0.0$	1.55	100%
$y=0.1$	1.57	33.2%	$y=0.05$	1.56	62.3%
$y=0.2$	1.51	4.98%	$y=0.1$	1.57	29.8%

因此,少量的Ba和Sr掺杂对于抑制PZT中电荷缺陷的确有明显效果.这些电荷缺陷主要是氧空位,因为直流电导给出的激活能 U 在1.5eV左右,不大可能是电子或者空穴的激活能^[20].

图8(a)和8(b)分别示出不同Ba和Sr掺杂量下PZT薄膜室温极化疲劳实验数据.实验结果有力支持了我们的设计思路,即抑制氧空位能够极大程度上抑制极化疲劳行为. Ba掺杂10%和Sr掺杂20%可以保证在 10^{10} 次翻转后薄膜仍然没有明显疲劳的痕迹,也就是说,PZT薄膜的疲劳现象被极大地遏制,基本满足应用的要求.

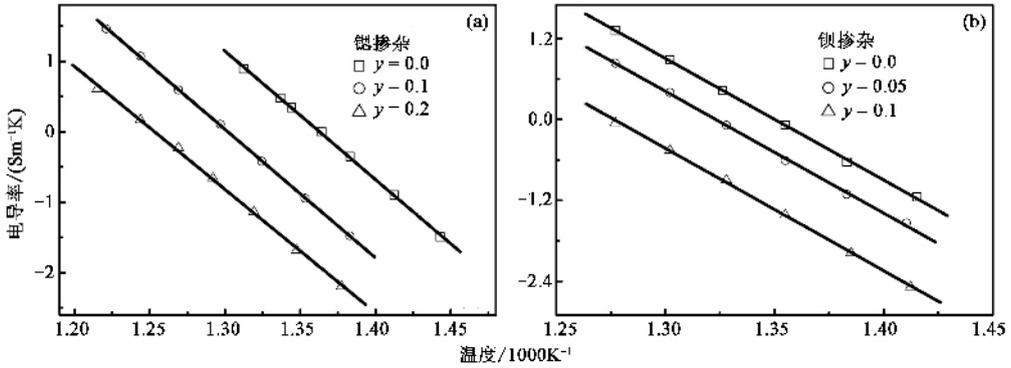


图7 PZT($x=0.52$)薄膜在(a)锶掺杂和(b)钡掺杂时直流电导率与温度的依赖关系^[19]

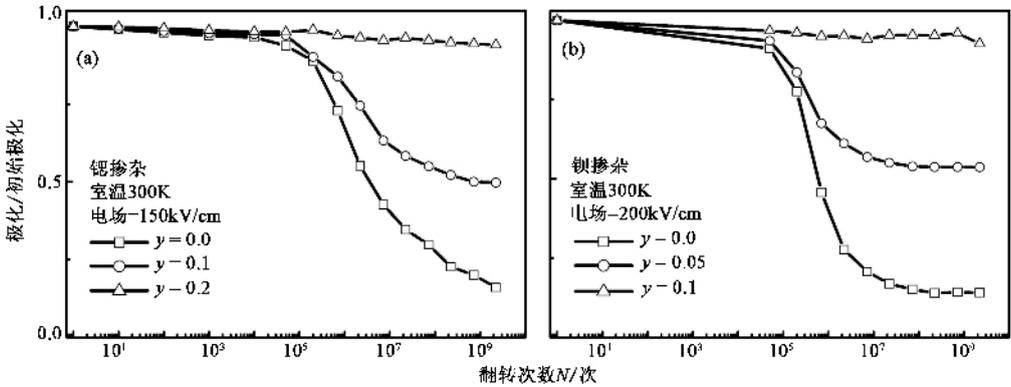


图8 PZT($x=0.52$)薄膜在不同锶掺杂(a)和钡掺杂(b)情况下的疲劳实验结果^[19]

然而, Ba 和 Sr 掺杂在大幅改善 PZT 抗疲劳特性的同时不能降低其铁电性能. 为了确认这一点, 我们细致研究了不同掺杂后 PZT 薄膜和陶瓷样品的铁电回线, 结果显示, 扣除掺杂对 PZT 薄膜取向的细微影响之外, Ba 掺杂 10% 和 Sr 掺杂 20% 对 PZT 铁电极化的抑制在 10% 以内, 对铁电性能使用基本没有影响.

最后, 我们回到最初的电荷注入极化疲劳机制问题上. 在整个实验研究过程中, 我们没有考虑电荷注入对于畴钉扎的影响. 电荷注入的一个附加效应是疲劳样品漏电流的增加. 我们仔细分析了样品疲劳前后的漏电流问题, 并没有观测到漏电流的升高. 因此, 我们认为电荷注入不应该是 PZT 疲劳的一个主要原因.

6 结论

本文从物理分析和实验验证角度系统总结并分析了沉积在 Pt/Si 衬底上 PZT 铁电薄膜的极化疲劳问题. 通过对不同温度、电场、频率作用下 PZT 疲劳的实验, 我们确认氧空位的长程迁移是导致极化疲

劳的主要原因, 虽然体钉扎模式也起一定作用. 通过少量碱土金属 Ba 和 Sr 的掺杂, 我们获得了室温基本无极化疲劳的 PZT 铁电薄膜, 从而在很大程度上解决了这一问题. 有关这一工作的细节可参阅文献 [16, 17, 19, 21].

致谢 袁国亮和魏通对本文的实验提供了帮助和部分数据, 特此致谢.

参考文献

- [1] Scott J F, Araujo C A. *Science*, 1989, 246: 1400
- [2] Auciello O, Scott J F, Ramesh R. *Phys. Today*, 1998, 51(7): 22
- [3] de Araujo C A P, Cuchiari J D, McMillan L D *et al.* *Nature (London)*, 1995, 374: 627
- [4] Colla E L, Taylor D V, Tagantsev A K *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72: 2478
- [5] Majumder S B, Mohapatra Y N, Agrawal D C. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70: 138
- [6] Jiang A Q, Scott J F, Dawber M *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2002, 92: 6756
- [7] Colla E L, Hong S, Taylor D V. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72: 2763
- [8] Pawlaczyk C, Tagantsev A K, Brooks K *et al.* *Integr. Ferroelectr.*, 1995, 8:

[9] Colla E L , Tagantsev A K , Taylor D V *et al.* Integr. Ferroelectr. , 1997 , 18 : 19

[10] Warren W L , Dimos D , Tuttle B A *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1994 , 65 : 1018

[11] Warren W L , Dimos D , Tuttle B A *et al.* J. Appl. Phys. , 1995 , 77 : 6695

[12] Tagantsev A K , Stolichnov I A. Appl. Phys. Lett. , 1999 , 74 : 1326

[13] Lou X J , Zhang M , Redfern S A T *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006 , 97 : 177601

[14] Dawber M , Scott J F. Appl. Phys. Lett. , 2000 , 76 : 1060

[15] Kim S H , Choi Y S , Kim C E *et al.* Thin Solid Films , 1998 , 325 : 72

[16] Wang Y , Wang K F , Zhu C *et al.* J. Appl. Phys. , 2006 , 99 : 044109

[17] Wang Y , Yuan F , Wei T *et al.* J. Appl. Phys. , 2007 , 101 : 016101

[18] Weast R C A Edited. CRC Handbook of Chemistry and Physics. , 61st ed. , Boca Raton, Florida : CRC Publisher , 1974

[19] Wang Y , Shao Q Y , Liu J M. Appl. Phys. Lett. , 2006 , 88 : 122902 ; Wang Y , Wang K F , Zhu C *et al.* J. Appl. Phys. , 2007 , 101 : 046104

[20] Deng G C , Li G R , Ding A L *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 : 192905

[21] Yuan G L , Liu J M. Appl. Phys. Lett. , 2004 , 84 : 954 ; Yuan G L , Liu J M , Wang Y P *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2004 , 84 : 3552 ; Liu J M , Wang Y , Zhu C *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 : 042904

中国科学院物理研究所 2008 年度人才招聘启事

中国科学院物理研究所是以凝聚态物理研究为主,包括凝聚态物理、光物理、原子分子物理、等离子体物理、理论物理等多学科的综合性科研机构。现将 2008 年度人才招聘计划公布如下,邀请有物理、化学、材料科学及相关领域技能的人才申请科研、技术职位。

一、招聘岗位

(一) 科研人才

从事超导、表面物理、磁学、光学物理、先进材料与结构分析(电子显微镜)、纳米物理与器件(真空物理)、极端条件物理、凝聚态理论与材料计算、软物质物理、固态量子信息与计算等学科的科学研究的科学研究。

(二) 技术人才

为本所科研人员的物理实验工作提供技术支持。

二、应聘材料

1. 个人简历;
2. 发表的代表性论文(复印件);
3. 推荐信。

三、联系方式

通讯地址 北京海淀区中关村南三街 8 号中国科学院物理研究所人事处(邮编:100080)

联系人:周明波;传真:(010)82649218;电话:(010)82648166;Email:zhoubm@iphy.ac.cn



北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等。



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜。
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金,及介质反射镜。直径 5mm—200mm。
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶。直径 5mm—200mm。
- 各种有色玻璃滤光片:规格为直径 5mm—200mm。(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片。
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。

地址 北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座#306 室

电话 010-88096218/88096217 传真 010-88096216 网址 www.goldway.com.cn

联系人 陈镛先生 施楠小姐 曾安小姐

E-mail kevinchen@goldway.com.cn shinan@goldway.com.cn zengan@goldway.com.cn