

PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃/MgO 多层膜的制备与储能性能

冯 莹, 魏贤华

(西南科技大学材料与化学学院, 四川 绵阳 621000)

摘 要: PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃(PZT)薄膜铁电性能优异, 在介质储能领域广受关注, 但漏电流大、击穿场强受限的问题制约其应用。利用高绝缘性 MgO, 构建 PZT/MgO 多层异质结构, 结合 500~600 °C 退火温度调控优化性能。结果显示, 多层膜随温升结晶度提升, 550 °C 最优退火温度下, 薄膜击穿场强高达 6.77 MV/cm, 可恢复能量密度 66.0 J/cm³, 能量效率 68.9%, 且介电损耗、漏电流小, 频率及循环稳定性优异。研究表明, MgO 层的插入以及结晶度对极化与击穿的平衡策略, 可有效抑制载流子迁移, 获得较佳的储能性能。

关键词: 铅钛酸铅基; 多层薄膜; 储能性能; 介电性能; 溶胶-凝胶法

中图分类号: TB32 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)06-1910-06

网络出版时间: 2026-05-13



在新能源、脉冲功率系统及集成电子设备快速发展背景下, 兼具超高功率密度、超快充放电速率与长寿命的储能器件需求迫切。传统电化学储能设备虽能量密度较高, 但充放电速率慢, 难以满足高频脉冲场景需求^[1,2], 而无机薄膜储能电介质电容器凭借微秒级放电速度、高安全性及优异循环稳定性, 成为解决该瓶颈的关键方案^[3]。相较于有机电介质[如商用双向拉伸聚丙烯(BOPP)薄膜, 长期工作温度 ≤85 °C, 可恢复能量密度 W_{rec} 仅 1~2 J/cm³]^[1]与无机块体陶瓷, 无机薄膜(如钙钛矿型、铋层状结构)工作温度范围宽^[4], 且结构致密、缺陷密度低, 击穿场强可提升 3~5 倍[如 SrTiO₃ 外延薄膜的击穿场强 E_b 达 6.8 MV/cm]^[5], 易通过微结构调控实现高 E_b 与 W_{rec} 。但传统无机薄膜面临能量密度与效率难以协同提升的问题^[6], 如早期 Pb(Zr,Ti)O₃(PZT)薄膜虽极化强度高, 但因其剩余极化 P_r 大导致能量效率 η 不足 50%^[7], 亟须通过材料设计与结构优化突破性能局限^[8]。

电介质电容器基于静电储能, 核心性能由极化强度-电场(P - E)回线决定, 总能量密度 W_t 、 W_{rec} 及 η 计算公式分别为:

$$W_t = \int_0^{P_{\text{max}}} E dP \quad (1)$$

$$W_{\text{rec}} = \int_{P_r}^{P_{\text{max}}} E dP \quad (2)$$

$$\eta = \frac{W_{\text{rec}}}{W_t} \times 100\% \quad (3)$$

想要获得性能优异的无机薄膜电介质电容器, 可以从高 E_b 、大饱和极化 P_{max} 、大 $\Delta P(P_{\text{max}}-P_r)$ 、低介损及宽温频稳定性等方面着手^[1]。如在 SrTiO₃ 基薄膜中引入 Al₂O₃ 绝缘层使其 E_b 达 6467 kV/cm^[9], 通过高熵调控, 薄膜在 320 °C 仍能储能性能稳定^[4], 拓扑涡旋域工程可提升介电性能^[10], 生成式学习帮助发现高熵陶瓷电介质^[11], 多种手段均可优化其核心性能^[6,12-14]。

在众多无机薄膜电介质材料中, PZT 因铁电特性独特、可调控性强, 成为研究最广泛的体系之一。尽管 PZT 薄膜极化性能优异, 但纯相 PZT 存在漏电流较大、击穿场强受限及高温下铁电有序性易衰减等问题, 制约其在高场、高温场景的应用^[15]。为解决上述问题, 研究者们提出多种思路。如 PZT 为钙钛矿型结构, 可调节 Zr/Ti 比例实现铁电相、弛豫铁电相与顺电相转变, 满足不同储能需求^[16]; 还可以通过溶胶-凝胶法、脉冲激光沉积(PLD)等实现大面积沉积, 与 Si 基半导体工艺兼容^[17], 便于集成应用。在储能

收稿日期: 2025-11-12。 修订日期: 2026-01-09。

基金项目: 四川省科学技术厅项目(2024YFHZ0350); 西南科技大学研究生创新基金(25ycx1018)。

第一作者: 冯 莹(1999—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 魏贤华(1976—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-11-12. Revised date: 2026-01-09.

First author: FENG Ying (1999—), female, Master candidate.

E-mail: 2320599173@qq.com

Correspondent author: WEI Xianhua (1976—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: weixianhua@swust.edu.cn

性能方面,优化后的 PZT 基薄膜已展现出优异潜力,如 Ce 掺杂 PZT 多层膜在 6.49 MV/cm 电场下实现 74 J/cm^3 的储能密度 W_{rec} [8]; Nb–Nd 共掺杂改善介电敏感性[18]; La 掺杂,可降低 P_r 并诱导弛豫铁电特性,使储能效率提升至 70% 以上[19]; Liu 等利用脉冲激光沉积技术制备 PZT–MgO 自组装纳米复合薄膜,发现树枝状纳米极性结构中 PZT 极性区域与宽禁带 MgO 绝缘相形成倾斜异质界面,延长电树传播路径、提升击穿势垒,实现极化与击穿协同优化[20]。而溶胶–凝胶法成本更为廉价、工艺简便、易于大面积成膜及与现有半导体工艺兼容性强,易于通过逐层沉积与控制退火温度来设计多层膜。基于上述研究,本工作提出通过溶胶–凝胶法在 PZT 薄膜中引入 MgO 作为绝缘层,构建“PZT/MgO”多层异质结构,并考虑极化与击穿之间平衡的基础上,重点探究退火温度对该多层膜相结构、微观结构、介电性能和储能性能的影响。

1 实验

1.1 样品制备

通过溶胶–凝胶法制备 PZT(本工作的 PZT 组成为 $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$)和 MgO 薄膜的前驱体溶液。以三水乙酸铅($\text{PbC}_4\text{H}_6\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 科隆, 99.5%, 质量分数)、钛酸丁酯($\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$, 科隆, 99%)和正丙醇锆($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Zr}$, 阿拉丁, 70%)为原料,用乙二醇甲醚($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$, 科隆, 99%)和冰乙酸($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, 科隆, 99.5%)溶解,搅拌 3.5h,并加入乙酰丙酮($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$, 阿拉丁, 99.5%)抑制钛酸丁酯水解。同样,将乙酸镁($\text{C}_4\text{H}_6\text{MgO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 阿拉丁, 99%)溶解在乙二醇甲醚($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$, 科隆, 99%)和冰乙酸($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, 科隆, 99.5%)中。并将 PZT 和 MgO 前驱体溶液浓度均调整为 0.5 mol/L,放于干燥避光的室温环境静置陈化 24 h 备用。

采用分层制备工艺,先通过旋涂法以 4000 r/min 速率旋涂 30 s,在 Pt/Ti/SiO₂/Si 衬底上旋涂两层 PZT 前驱体(每层均经 200 °C 干燥 5 min、450 °C 热解 10 min),随后旋涂 1 层 MgO 前驱体并完成相同干燥与热解处理,最后再旋涂 2 层 PZT 前驱体,重复上述预热工艺后,在 500~600 °C 氧气氛围下退火 10 min,最终形成“PZT(2 层)–MgO(1 层)–PZT(2 层)”的多层异质结构,确保层间界面结合紧密。

1.2 样品表征

用日本理学 Rigaku Ultima IV 型 X 射线衍射仪(XRD)分析薄膜的晶体结构。用美国赛默飞 Thermo

Scientific Apreo 2C 型扫描电子显微镜观察样品表面和横截面形貌。用美国吉时利 Keithley 2400 型半导体参数分析仪测薄膜漏电流特性。采用磁控溅射法在样品表面溅射直径为 200 μm 的金电极。用德国 aixACCT TF analyzer 3000 型半导体参数分析仪测试多层膜的 P – E 电滞回线、 E_b 、介电常数、介电损耗和稳定性。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图 1 为 PZT/MgO 多层膜在 500~600 °C 退火 10 min 的 XRD 谱。PZT/MgO 多层膜在 500 °C 退火,除衬底特征峰外,PZT 相[如(100)、(110)、(200)晶面]和 MgO 相[如(200)晶面]的特征峰强度较弱,表明此时多层膜结晶程度较低;随着退火温度从 500 °C 逐渐升高至 600 °C,PZT 相和 MgO 相的特征峰强度显著增强,这表明随着退火温度的提升,多层膜的结晶度逐渐升高,PZT 晶粒得到充分生长,这种结晶度随退火温度的演变规律,与 PZT 铁电材料的晶化特性一致,适宜的高温能促进钙钛矿相晶粒的成核与长大。

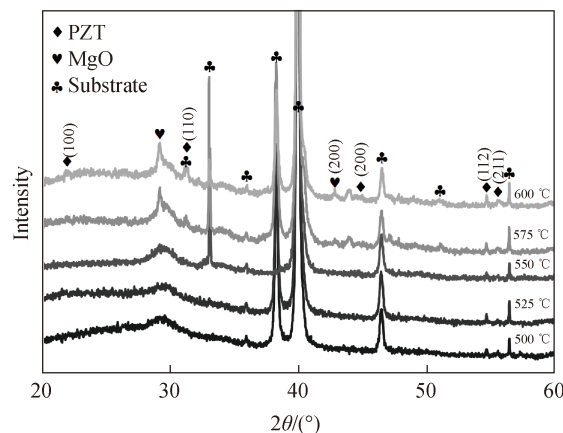


图 1 PZT/MgO 多层膜的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of PZT/MgO multilayer films

2.2 显微结构分析

图 2 为 PZT/MgO 多层膜在 550 °C 退火 10 min 的表面和截面的扫描电子显微镜(SEM)照片。由图 2 可以看出,薄膜表面均匀致密,没有明显的孔洞、裂纹或晶粒团聚现象。并且 PZT/MgO 多层膜的结构紧密,未见明显分层或空隙,多层膜总厚度约为 250 nm (图 2b)。

2.3 储能与介电性能分析

结晶度是影响电介质材料极化与击穿行为的关键因素。结晶区域具有长程有序的氧八面体结构,

有利于铁电畴的定向排列与翻转，从而在电场下产生较大的 $P_{\max}$ ；但晶粒生长过程中易引入晶界、缺陷和界面态，这些区域易成为载流子迁移和击穿的通道，从而降低材料的 E_b 。相反，非晶态区域因结构均匀、无晶界缺陷，具有较高的 E_b ，但其缺乏长程有序的极化机制，极化响应较弱，导致 $P_{\max}$ 较低。因此，在 PZT/MgO 多层膜中，结晶度的调控实质上是在极化能力与击穿耐受性之间寻求最佳平衡。

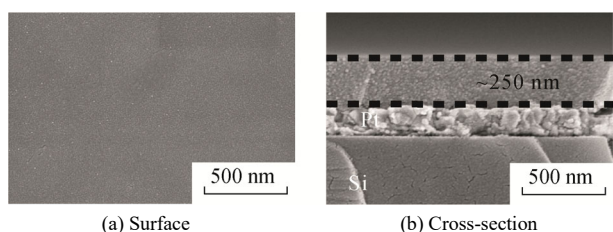


图2 多层膜在 550 °C 退火 10 min 后表面和横截面的扫描电子显微镜照片

Fig. 2 SEM images of surface and cross-section of multilayers annealed at 550 °C for 10 min

图3为梯度温度下 PZT/MgO 多层膜电容器在低电场和各自最大击穿电场的 $P-E$ 回线(测试频率为 1 kHz)。由图3可见，将 MgO 作为绝缘层插入 PZT 薄膜中，可形成“PZT(铁电层)-MgO(绝缘层)”的异质结构，利用 MgO 的高绝缘性抑制载流子注入与迁移，降低漏电流密度。低温退火(如 500 °C)条件下，薄膜结晶度低，此时材料表现出较高的

E_b ，但由于铁电畴发育不充分，极化响应弱， $P-E$ 回线斜率较小(图3a)，储能密度受限。随着退火温度升高至 550 °C，晶粒缓慢发育，结晶度与界面结合度达到平衡，此时铁电畴结构完善，极化增强，同时 MgO 绝缘层有效抑制界面漏电流，使 E_b 仍保持较高水平(6.77 MV/cm)。此时 $P-E$ 回线呈现“细长”形态(图3d)，即高 ΔP 与适中击穿场强的结合，从而实现高 W_{rec} 与 η 的协同优化。当退火温度过高(如 600 °C)时，晶粒异常长大，引入更多缺陷和漏电路径，使击穿场强急剧下降，储能效率显著降低(图3f)。因此，退火温度是调控 PZT/MgO 多层膜储能性能的关键工艺参数，550 °C 为该体系的最优退火温度，可在 6.77 MV/cm 的电场下，实现 66.0 J/cm³ 的可恢复能量密度与 68.9% 的能量效率。

图4为多层薄膜的介电性能。由图4可以看出，从 500 °C 到 550 °C，多层膜的介电常数和介电损耗变化不明显，但超过 550 °C 后介电常数和介电损耗均随退火温度升高而增加，这是因为退火温度影响了多层膜的结晶度与微观结构：低温时，晶粒生长不充分，还处于非晶态，介电响应较弱；随退火温度增加，晶粒充分发育，铁电畴结构完善，介电响应增强，介电常数提升，在 575 °C 和 600 °C 之间介电常数存在一个较大的增幅，这应与 PZT 薄膜在此温度附近发生显著结晶有关。适宜的退火温度，既能保证一定的介电响应，又能抑制损耗的过度增加。

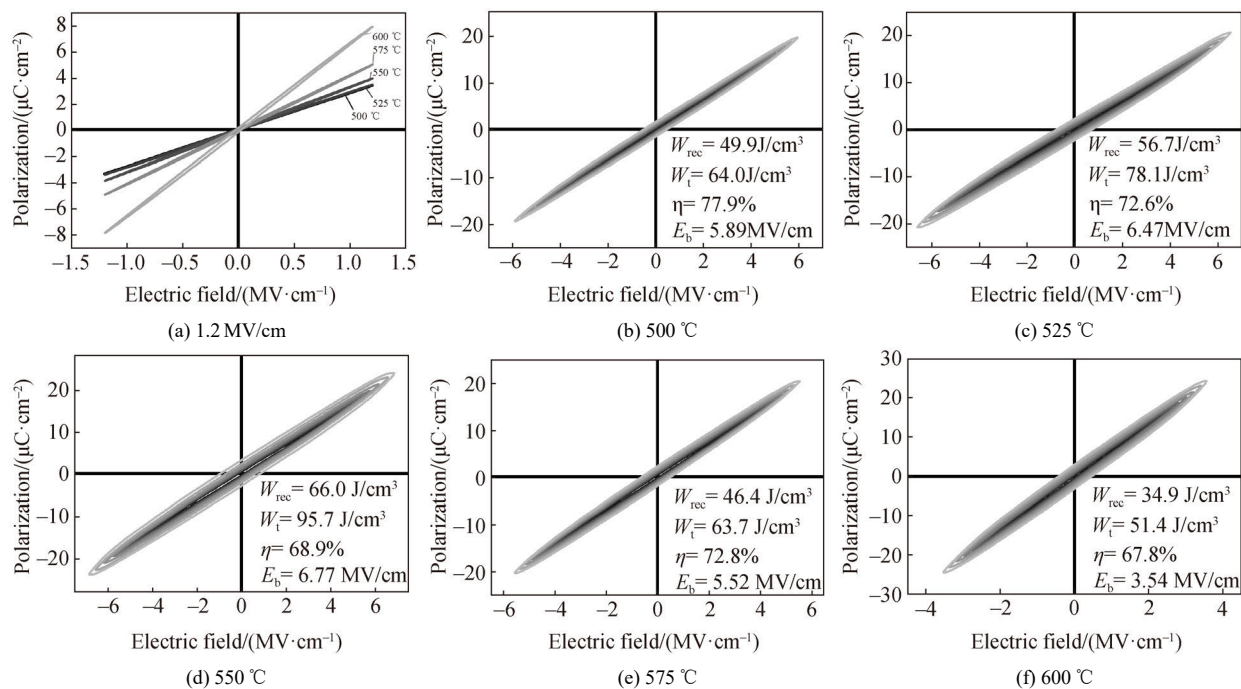


图3 PZT/MgO 多层膜铁电极化特性与退火温度的关联性分析

Fig. 3 Analysis of the correlation between ferroelectric polarization properties and annealing temperature in PZT/MgO multilayer films

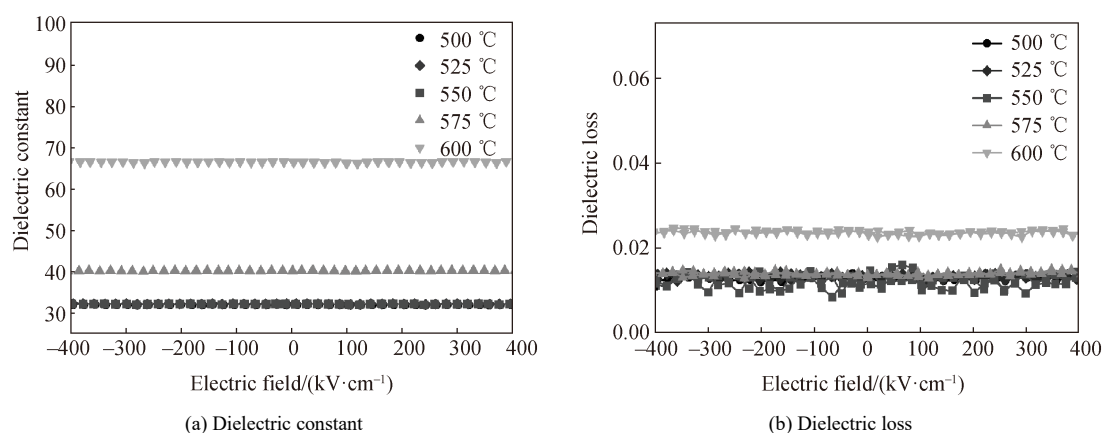


图 4 多层薄膜的介电性能
Fig. 4 Dielectric properties of multilayer films

为准确描述击穿强度的分布, 采用威布尔分布函数对其进行分析(见图 5a), 如下式所示:

$$X_i = \ln(E_i) \quad (4)$$

$$Y_i = \ln \ln(1 - P_i)^{-1} \quad (5)$$

$$P_i = \frac{i}{(n+1)} \quad (6)$$

式中: n 为样品总数; i 为样品按照实际击穿电场从小到大的排序, E_i 为第 i 个样品的击穿场强值。不同退火温度的 PZT/MgO 多层膜拟合直线的斜率 β (威布尔系数) 分别为 43.00、25.66、19.92、13.59、10.64。通常认为, β 越大, 表明击穿场强的分散性越小、可靠性越高^[1]。不同退火温度下, 多层膜的 β 值存在明显差异, 550 °C 退火的多层膜在保持高击穿场强情况下, β 值仍有 19.92, 击穿稳定性较高, 并且在 0~2.4 MV/cm 的外加电场范围下, 漏电流密度小于 10^{-7} A/cm^2 。随着退火温度升高, 多层膜的威布尔系数 β 与 E_b 同时降低, 这与晶粒生长导致晶粒尺寸分布不均匀及其更多缺陷形成有关, 从而使

击穿行为的一致性下降。图 5b 为多层膜随电场增加的储能性能变化, 并对 W_{rec} 按照 $W_{\text{rec}} \sim E^n$ 的指数关系进行拟合。随着电场从 1 MV/cm 增加到 6 MV/cm, W_{rec} 逐渐上升, η 逐渐减小。对 W_{rec} 的拟合结果显示 $n \approx 1.89$, 接近理想线性电容器的 $n = 2$, 该多层膜具有准线性极化特性, 这与电滞回线所体现的极化行为相契合, 在高电场下仍能保持较好的储能特性。

图 6 为多层薄膜的频率稳定性和循环稳定性。当频率从 1 kHz 增加到 30 kHz 时, 多层膜的可恢复能量密度和能量效率波动较小, 展现出良好的频率稳定性(图 6a)。内嵌图的 $P-E$ 回线在不同频率下均保持纤细特征, 进一步说明该多层膜在宽频率范围内具有稳定的电学响应。而经过 10^8 次充放电循环后, W_{rec} 和 η 的衰减程度极小, $P-E$ 回线无明显变化, 表明该多层膜具有优异的循环稳定性, 能够在长期充放电过程中维持稳定的储能性能(图 6b)。

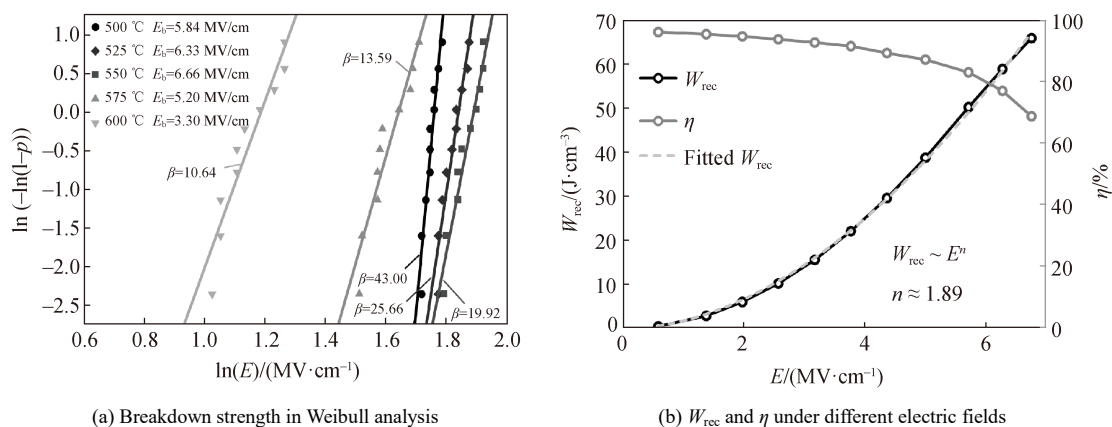


图 5 多层膜的威布尔系数分析和储能性能模拟

Fig. 5 Weibull coefficient analysis and energy storage performance simulation of multilayer films

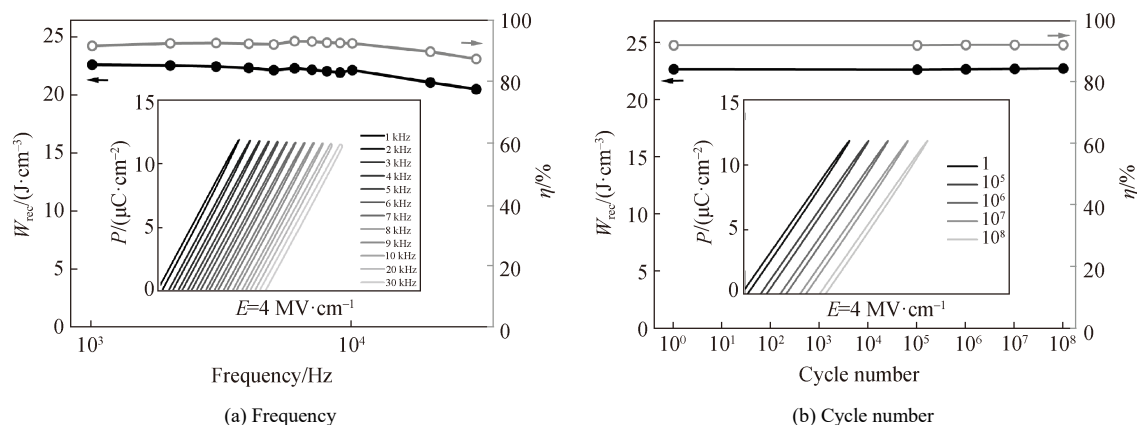


图6 多层薄膜的频率稳定性和循环稳定性
Fig. 6 Frequency stability and cycling stability of multilayer films

3 结论

采用溶胶-凝胶法制备 PZT/MgO 多层异质结构薄膜, 探究不同退火温度对其结构、介电及储能性能的影响。研究表明, MgO 层的插入以及结晶度对极化与击穿的平衡策略, 可有效抑制载流子迁移, 获得较佳的储能性能。随着退火温度增加, PZT 相和 MgO 相结晶度逐步提升; 550 °C 时表面致密无缺陷、层间界面结合紧密。适宜的退火温度可协同优化多层膜击穿场强与极化特性, 其中, 退火 550 °C 的多层膜展现最佳综合储能性能: 在 6.77 MV/cm 的击穿电场(E_b)下, 获得 66.0 J/cm³ 的可恢复能量密度(W_{rec})与 68.9% 的能量效率(η), 且介电损耗低(< 0.02)、漏电流密度小(2.4 MV/cm, $< 10^{-7}$ A/cm²)。此外, 该多层膜还具备优异的频率稳定性、循环稳定性及准线性极化特性, 是高功率密度储能电容器的潜在候选材料。

参考文献:

- [1] 魏贤华. 储能电容无机电介质薄膜研究进展[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2024, 47(3): 312–327.
WEI Xianhua. J Sichuan Norm Univ: Nat Sci, 2024, 47(3): 312–327.
- [2] MA X, ZHOU Y J, WEI X H. Achieving an appropriate polarization-breakdown synergy of multilayer films for dielectric energy storage through temperature gradient annealing[J]. Ceram Int, 2024, 50(24): 55760–55765.
- [3] LIU Y J, LI M S, JIANG K, et al. Radiation-hardened dendritic-like nanocomposite films with ultrahigh capacitive energy density[J]. Nat Commun, 2025, 16: 3882.
- [4] QIAN J, GE G L, YU Z Y, et al. High temperature stable capacitive energy storage up to 320 °C in high-entropy dielectric thin film[J]. Nano Energy, 2025, 135: 110651.
- [5] HOU C M, HUANG W C, ZHAO W B, et al. Ultrahigh energy density in SrTiO₃ film capacitors[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(24): 20484.
- [6] LEE E, SON J Y. Energy storage and ferroelectric properties of solid solution thin films composed of Bi₂CuTiO₆ and PbTiO₃[J]. J Power Sources, 2025, 659: 238400.
- [7] LIU Q L, ZHANG Y X, WANG R J, et al. Intercalation strategy induced superior energy storage performance in Aurivillius Bi₆Ti₃FeAlO₁₈ film under low and medium electric fields[J]. J Materomics, 2025, 12(1): 101113.
- [8] ZHOU Y J, MA X, XIAO S H, et al. Dopant induced polarization and breakdown balance via multilayer thin films with different crystallinities for energy storage in PZT homostructures[J]. Appl Phys Lett, 2024, 125(13): 132904.
- [9] ZHANG X L, SUN S M, YIN C, et al. Giant recoverable energy storage density for lead-free SrTiO₃-based dielectric films coated by the amorphous Al₂O₃ insulating layers[J]. J Adv Ceram, 2025, 14(11): 9221175.
- [10] QIAN J, YU Z Y, GE G L, et al. Topological vortex domain engineering for high dielectric energy storage performance[J]. Adv Energy Mater, 2024, 14(8): 2303409.
- [11] LI W, SHEN Z H, LIU R L, et al. Generative learning facilitated discovery of high-entropy ceramic dielectrics for capacitive energy storage[J]. Nat Commun, 2024, 15(1): 4940.
- [12] 王鑫, 郝华, 李东旭, 等. Sr_{0.7}Bi_{0.2}TiO₃ 改性 Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃ 基薄膜电储能特性的优化[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(4): 1374.
WANG X, HAO H, LI D X, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(4): 1374.
- [13] 吕盼盼, 石长清, 辛乐, 等. 柔性 Pb_{0.99}Sm_{0.01}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.68}Ti_{0.32}O₃ 弛豫铁电薄膜储能特性[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(4): 1301.
LU P P, SHI C Q, XIN L, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(4): 1301.
- [14] YANG Z J, HUANG R, ZHANG J, et al. Engineering multi-ion doping by entropy for high energy storage density with high efficiency in amorphous thin film[J]. Ceram Int, 2024, 50(19): 36375–36382.
- [15] ZHANG W L, MOU X P, MA Y P, et al. Phase coexistence induced giant dielectric tunability and electromechanical response in PbZrO₃ epitaxial thin films[J]. Small, 2025, 21(9): 2410260.
- [16] HABEEB KHAN A M, PRABU M, KHAN A K, et al. Dielectric and ferroelectric characterization of niobium doped PZT (52/48) nanoceramics[J]. J Alloys Compd, 2023, 967: 171529.
- [17] LI H, HU Y H, WEI S Y, et al. Oxygen plasma-assisted ultra-low temperature sol-gel-preparation of the PZT thin films[J]. Ceram Int, 2023, 49(7): 10864–10870.
- [18] YOUSEFI F, ESFAHANI H. Role of Nb⁵⁺-Nd³⁺ co-dopant in morphotropic boundary of electrospun PZT nanoneedles: Study on

dielectric and piezoelectric sensitivity[J]. *J Alloys Compd*, 2023, 966: 171531.

[19] MA X, CHEN B Y, WEI X H. Enhanced energy storage performance of $(\text{Pb}, \text{La})(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3/\text{SrTiO}_3$ multilayer films via a synergistic strategy[J]. *Appl Phys Lett*, 2023, 123(2): 022902.

[20] LIU Y J, ZHANG Y, WANG J, et al. Ultrahigh capacitive energy storage through dendritic nanopolar design[J]. *Science*, 2025,

388(6743): 211–216.

作者贡献声明:

冯莹: 设计研究方法和实验方案、绘制图表、分析/综合数据并推导结论、验证、撰写初稿

魏贤华: 论文构思、监督指导、审阅与修订

Energy Storage Properties of $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3/\text{MgO}$ Multilayer Films

FENG Ying, WEI Xianhua

(Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Extended Abstract

Introduction With the rapid development of new energy, pulsed power systems and other fields, there is an urgent demand for energy storage devices with a high power density, a fast charge-discharge rate and a long service life. Inorganic thin-film dielectric capacitors, featuring microsecond-level discharge speed and high safety, face a challenge of synergistically improving energy density and efficiency (e.g., the existing PZT thin films have an efficiency of <50% due to the large remanent polarization). As a widely studied material, PZT has an excellent polarization but a large leakage current. The existing optimizations include doping and heterostructure construction. This paper was to fabricate a "PZT/MgO" multilayer heterostructure by a sol-gel method. MgO was introduced to obtain a slim hysteresis loop, and the effect of annealing temperature on the phase structure, microstructure, dielectric and energy storage properties was investigated.

Methods 0.5 mol/L $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ (PZT) and MgO thin film precursor solutions were prepared by a sol-gel method, aged at room temperature in dry darkness for 24 h, and then spin-coated on Pt/Ti/SiO₂/Si substrates at 4000 r/min for 30 s. The wet films were dried at 200 °C for 5 min and pyrolyzed at 450 °C for 10 min. The process was repeated to obtain "PZT/MgO" multilayer films, which were annealed in O₂ at 500–600 °C for 10 min.

The crystal structure was analyzed by X-ray diffraction (XRD, Rigaku Co., Japan). The surface/cross-sectional morphologies were determined by scanning electron microscopy (SEM, Thermo Scientific Co., USA). The leakage current was characterized by a Keithley 2400 analyzer (Keithley Co., USA). Au electrodes with the diameter of 200 μm were sputtered, and the *P*-*E* loops, breakdown strength (*E*_b), dielectric properties, and stability were determined by an aixACCT TF Analyzer 3000 (TF Co., Germany).

Results and discussion The results show that the characteristic peaks of the perovskite phase of PZT and MgO phase are intensified, the full width at half maximum (FWHM) is narrowed, and the crystallinity is improved with the increase of temperature when the PZT/MgO multilayer heterostructure thin films are annealed at 500–600 °C for 10 min. The SEM images show that the thin film annealed at 550 °C for 10 min has a dense and defect-free surface, a tight cross-sectional structure without delamination, and a total thickness of approximately 250 nm. In terms of dielectric properties, the dielectric constant and dielectric loss change slightly when annealed at 500–550 °C, but the both increases when the temperature exceeds 550 °C. For energy storage performance, the optimal annealing temperature is 550 °C. The recoverable energy density is 66.0 J/cm³ and the energy storage efficiency is 68.9% in an electric field of 6.77 MV/cm. At 550 °C, the leakage current of the thin film is $\leq 10^{-7}$ A/cm² in an electric field of 0–2.4 MV/cm, with the Weibull coefficient β of 19.93, indicating a high breakdown stability. Regarding the stability, the energy storage performance fluctuates slightly at 1–30 kHz in an electric field of 4 MV/cm. After 10⁸ charge-discharge cycles, the attenuation of *W*_{rec} (recoverable energy density) and η (energy storage efficiency) is extremely small. *W*_{rec} increases with the electric field ranging from 1 MV/cm to 6 MV/cm, and the fitting result shows that $n \approx 1.86$, presenting the quasi-linear polarization characteristics.

Conclusions The surface of PZT/MgO multilayer film annealed at 550 °C for 10 min was dense without obvious delamination, and the thickness was approximately 250 nm, exhibiting good dielectric properties. In an electric field of 6.77 MV/cm, this film had a recoverable energy density of 66.0 J/cm³ and an energy storage efficiency of 68.9%, with a leakage current $\leq 10^{-7}$ A/cm² (the Weibull coefficient β of 19.93). In addition, the film also had excellent frequency and cycling stability. *W*_{rec} increased with the electric field, and the fitting result showed that $n \approx 1.86$, presenting the quasi-linear polarization characteristics.

Keywords lead zirconate titanate-based; multilayer thin films; energy storage performance; dielectric properties; sol-gel method