文章编号: 1007－4252(2025)01－0048－08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0002

柔性云母基底上高性能 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ 铁电薄膜制备与性能研究

沈家宁
(福州大学物理与信息工程学院,福建 福州 350108)

摘要: 铪基铁电薄膜与传统的互补金属氧化物半导体(CMOS)加工工艺兼容,且在超薄膜厚(低至 1 nm)下仍具有良好的铁电性,用其制作的柔性铁电存储器将为柔性电子系统注入新的活力。然而,剩余极化强度不高且器件可靠性不佳是铪锆氧(HZO)基柔性铁电存储器普遍面临的问题。本研究在云母衬底上沉积了氧化铝缓冲层,制备了 W/TiN/HZO/TiN/Al_2O_3/Mica 结构的铁电存储器。该柔性铁电存储器表现出免“唤醒”特性,其二倍剩余极化强度高达 44 μC/cm^2,可耐受至少 10^9 次±3 MV/cm 的反复写擦。在弯曲半径低至 3 mm 以及经历高达 5 000 次弯曲的情况下,器件的剩余极化强度、矫顽场均未衰减,体现出良好的弯曲可靠性。进一步研究表明,氧化铝缓冲层能有效解决膜层之间应力失配所导致的膜层开裂问题,此外,HZO 中正交相存在且具有较大占比,这些可能是决定器件剩余极化强度高和可靠性好的重要因素。

关键词: 云母基底; 柔性; $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$; 铁电薄膜
中图分类号: TP333.5 **文献标志码:** A

Preparation and Research of High-performance $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ Ferroelectric thin Films on Flexible Mica Substrates

SHEN Jia-ning
(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Hafnium-based ferroelectric films are compatible with conventional CMOS processing and have good ferroelectric properties at ultra-thin film with thicknesses down to 1 nm. Flexible hafnium-based ferroelectric memories will breathe new life into flexible electronic systems. However, low remnant polarization and poor endurances are common problems faced by hafnium zirconium oxide (HZO) flexible ferroelectric memories. In this study, a ferroelectric memory with W/TiN/HZO/TiN/Al_2O_3/Mica structure was prepared after depositing an alumina buffer layer on the mica substrate. The flexible ferroelectric memory exhibits ‘wake-up’ free feature, with a double remnant polarization as high as 44 μC/cm^2, and can withstand repeated writing and erasing of at least 10^9 times under ±3 MV/cm. With bending radius as low as 3 mm and up to 5,000 bending cycles, both the remnant polarization and coercive field of the device do not decay, demonstrating a good bending reliability. Further studies show that the alumina buffer layer can effectively solve the cracking problem caused by the stress mismatch

收稿日期: 2024−11−09; **修订日期:** 2025−01−22
作者简介: 沈家宁(1999—),男,硕士,硕士在读,主要研究方向为柔性铪锆氧基铁电存储器(E-mail: 1034154362@qq.com).

between the layers. Moreover, the orthorhombic phase in HZO exists and accounts for a large proportion. These may be important factors in determining the high polarization and high device reliability.

Key words: mica substrate; flexibility; $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$; ferroelectric film

0 引言

现代电子技术的不断发展，对柔性电子提出了新的需求[1]。柔性铁电存储器因其非易失性、低功耗、操作速度快等优点成为柔性电子领域的重要候选技术。与传统钙钛矿材料相比，2011 年发现的氧化铪薄膜在同样具有良好铁电性的基础上，还表现出与环境友好且与 CMOS工艺兼容的优点，从而获得了广泛的关注[2–5]。在低至 1 nm 的膜厚下，对氧化锆（ZrO_2）与氧化铪（HfO_2）进行 1:1 掺杂而得到的 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$（HZO）仍具有很好的极化强度，为实现高性能柔性 HZO 铁电存储器带来了新的可能。

氧化铪基薄膜可以通过直接生长法和薄膜转移法附着于柔性衬底上[6–19]。Zhong 等人通过将 HZO 薄膜转移到柔性基底上，得到了与刚性基底相媲美的氧化铪薄膜铁电性能（剩余极化强度～20 μC/cm^2）[8]。但是该方法具有工艺复杂的弱点，因此在柔性基底上直接沉积铁电薄膜的方法备受推崇。此外，为了获得具有稳定铁电性的正交相结构，铪锆氧基铁电薄膜需要经过高温处理（＞500℃），这对柔性基底的温度耐受性提出了要求。相比于聚酰亚胺（PI）与聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）材料，具有更高耐温特性（＞1 000℃）的云母成为了柔性铁电存储器基底的理想材料。Xiao 等人采用原子层沉积（ALD）技术，直接在云母基底上制备了 TaN/HZO/TaN/Mica 铁电电容器，其剩余极化强度仅为 11 μC/cm^2，并且器件的弯曲能力有待提升（＞7.5 mm）[6]。随后，Liu 等人制备了器件结构为 TiN/$Hf_{0.6}Zr_{0.4}O_2$/TiN/Mica 的铁电电容器，但是其剩余极化强度（～12.5 μC/cm^2）仍不够理想[9]。因此，针对 HZO 基器件面临的剩余极化强度不高、器件耐久性差和弯曲能力不佳等问题，很有必要开发一种基于云母基底的高性能柔性铪锆氧基柔性铁电存储器。

在本文中，通过在电极薄膜与云母基底之间引入了 Al_2O_3 缓冲层，构造了 W/TiN/HZO/TiN/Al_2O_3/Mica 的器件结构，该器件拥有免“唤醒”特性，剩余极化强度（Pr）高达 22 μC/cm^2，并且至少能够耐受 10^9 次反复写擦，表现出了优异的性能。经测试，器件在弯曲半径低至 3 mm 或经历高达 5 000 次（5 mm）弯曲下仍旧表现出稳定的铁电性。本文所报道的高性能柔性铁电存储器的制备与研究，为柔性电子器件的推广和应用提供了新的思路。

1 实验部分

1.1 器件制备

器件制备的流程示意图如图 1（a）所示。首先，将购买来的云母片用胶带固定并进行解理，以得到干净平整的表面。随后，使用原子层沉积（ALD）系统，在云母基底上沉积 10 nm 的 Al_2O_3 薄膜。沉积过程中，腔室温度为 332 ℃，前驱体为三甲基铝（TMA）。然后，在室温中采用磁控溅射的方式生长 15 nm 的 TiN 底电极。接下来，利用 ALD 沉积 10 nm 的 HZO 膜层。沉积过程中，腔室温度为 280 ℃，并分别以四（二甲胺）铪（TDMAH）、四（二甲胺）锆（TDMAZ）和去离子水作为 Hf、Zr 和 O 的前驱源。然后，采用光刻工艺在 HZO 上进行图案化，其过程如下：在器件旋涂完光刻胶（采用光刻负胶）后进行前烘，接着将器件与掩模版直接接触并进行曝光，随后依次进行显影、清洗、甩干和坚膜，以形成 200 μm × 200 μm 的凹槽。随后，采用磁控溅射在光刻后的器件上制备 W（15 nm）/ TiN（30 nm）复合顶电极薄膜，再通过湿法剥离工艺去除多余的光刻胶，获得 200 μm × 200 μm 的顶电极阵列。TiN 与 W 电极薄膜的制备参数详见表 1。最后，器件在 550℃、N_2 氛围中退火 60 s。器件的结构示意图如图 1（b）所示

1.2 测试与表征

为评估薄膜的表面粗糙度，我们采用布鲁克公司的原子力显微镜（Dimension Icon, AFM）进行表面粗糙度表征。薄膜表面形貌采用扫描电子显微镜（Verios G4, SEM）进行表征。薄膜晶相结构采用掠入射式 X 射线衍射仪（DY5261/Xpert^3, Cu 靶）来测量衍射谱线图。使用铁电测试仪（Radiant

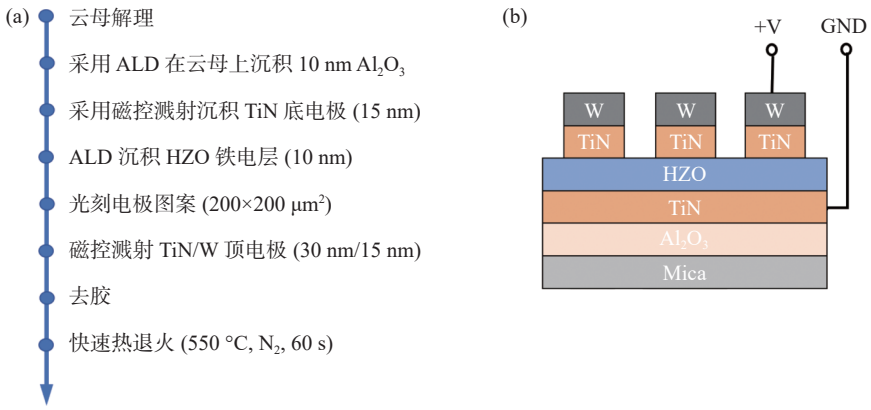

图 1 器件制备介绍:(a)器件制备流程示意图;(b)器件结构示意图

Fig. 1 Introduction to device preparation: (a) Schematic diagram of the device preparation processes; (b) Schematic diagram of the device structure.

表 1 电极薄膜的制备参数

Table1 Preparation parameters of electrode films

靶材	腔室真空（Pa）	射频功率（W）	溅射气体	溅射气压（Pa）	溅射时间（min）
TiN	7.0×10^{-4}	130	Ar	0.3	3/6(底/顶电极)
W	7.0×10^{-4}	50	Ar	0.2	10

technologies, Precision Ⅱ)测试器件的电滞回线、疲劳性能和 *I-V* 特性曲线,其中电滞回线的测试电压与频率分别为±3 V 与1 kHz,而耐久性能测试所用的电压与频率分别为 3 V 与 1 MHz。采用半导体参数测试仪(Keithley 4200-SCS)进行器件的 *C-V* 测试,测试源参数为 50 mV 和 10 kHz。在进行弯曲状态下各项性能的测试中,我们将器件粘贴在较柔软的塑料板(PET)上,控制模具伸缩进而控制器件的弯曲半径(如图 2 所示)。在弯曲次数对性能影响的评估中,采用的弯曲半径为 5 mm。

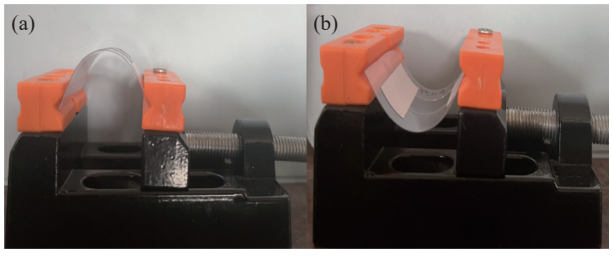

图 2 器件夹具的实物照片:(a)“凸弯曲”代表拉应力;(b)“凹弯曲”代表压应力

Fig. 2 Physical photographs of the device fixture: (a) ‘Convex bending’ represents tensile stress; (b) ‘Concave bending’ represents compressive stress.

2 结果与讨论

2.1 器件铁电性能

图 3(a)显示的是器件实物照片。可以看到,器件是透明的。此外,我们采用±3 MV/cm 的电压反复激励器件并在 1 次、10^3 次和 10^9 次激励后测试其电滞回线,如图 3(b)所示。结果表明,不同激励次数后的电滞回线基本重合,且 HZO 薄膜的剩余极化强度未见明显变化。可见,器件具有免“唤醒”特征,并且显示出良好的擦写耐受特性[20–22]。

2.2 器件弯曲的稳定性

为了进一步评估器件性能对弯曲的耐受能力,我们对该器件进行了一系列弯曲条件下的性能测试(如图 4 所示)。首先,我们测试了不同弯曲半径下的电滞回线并将结果呈现于图 4(a)中。可以看到,器件在凸弯曲(用“+”表示)及凹弯曲(用“−”表示)的各种弯曲半径下,都能呈现出几乎重合的电滞回线。为了进一步评估不同弯曲状态下器件性能的稳定性,我们提取不同弯曲半径下的剩余极化强度和矫顽场,并将其绘制在图 4(b)中(其中,为了更好表示未弯曲状态的弯曲半径,我们将横坐标绘制成弯曲半径的倒数)。可以看出,在弯曲状态下剩余极化强度与矫顽场均保持稳定。为了更加直观地评估数值的稳定性,我们计算了二倍剩余极化强度($2P_r$)与矫顽场(E_c)在不同弯曲半径下的波动情况并列于表 2。从表中可知,$2P_r$、$+E_c$ 与 $-E_c$ 的相对标准差分别为 1.58%、0.76%与 1.14%,这表明在弯曲状态下,器件的剩余极化强度与矫顽场均

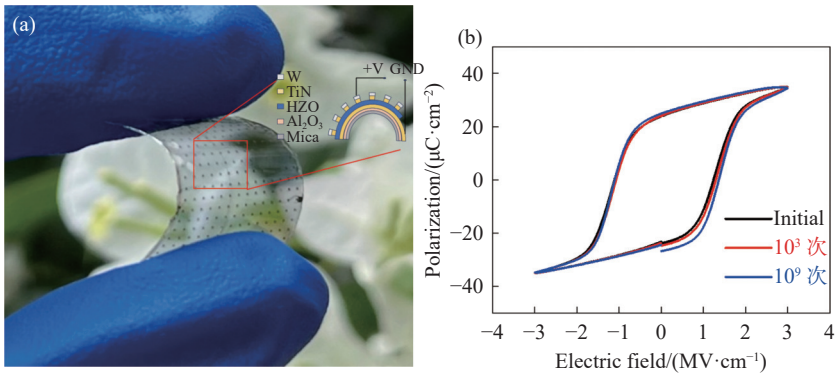

图 3　(a)器件实物照片(插图为器件结构示意图); (b)经±3 MV/cm 的电压多次刺激后的电滞回线

Fig. 3 (a) Physical photographs of the device (the inset shows a schematic diagram of the device structure); (b) The hysteresis loops after multiple stimulations with a voltage of ±3 MV/cm.

有良好的稳定性。此外, 除了极化强度与矫顽场, 器件弯曲状态下的相对介电常数-电场曲线(ε_r-E)、J-E 稳定性也值得探究。如图 4(c) 所示, 不同弯曲状态下的 ε_r-E 曲线均呈现出“蝴蝶形”, 这说明器件都具有良好的铁电性且弯曲对 ε_r-E 特性影响不大, 表明 ε_r-E 特性同样具有较好的弯曲稳定性。最后, 我们对不同弯曲状态下的 J-E 曲线进行了测试, 并将结果呈现于图 4(d)中。综合来说, 器件各项性能在不同弯曲半径下均能够很好地保持稳定。

除了探究弯曲半径对器件性能的影响以外, 弯曲次数对器件各项性能的影响也同样需要进行评估。因此, 我们选择在 5 mm 弯曲半径下, 将器件经历 0 次、1 000 次和 5 000 次弯折后的各项性能呈现于图 5。从图 5(a)可以看出, 器件经历不同弯折

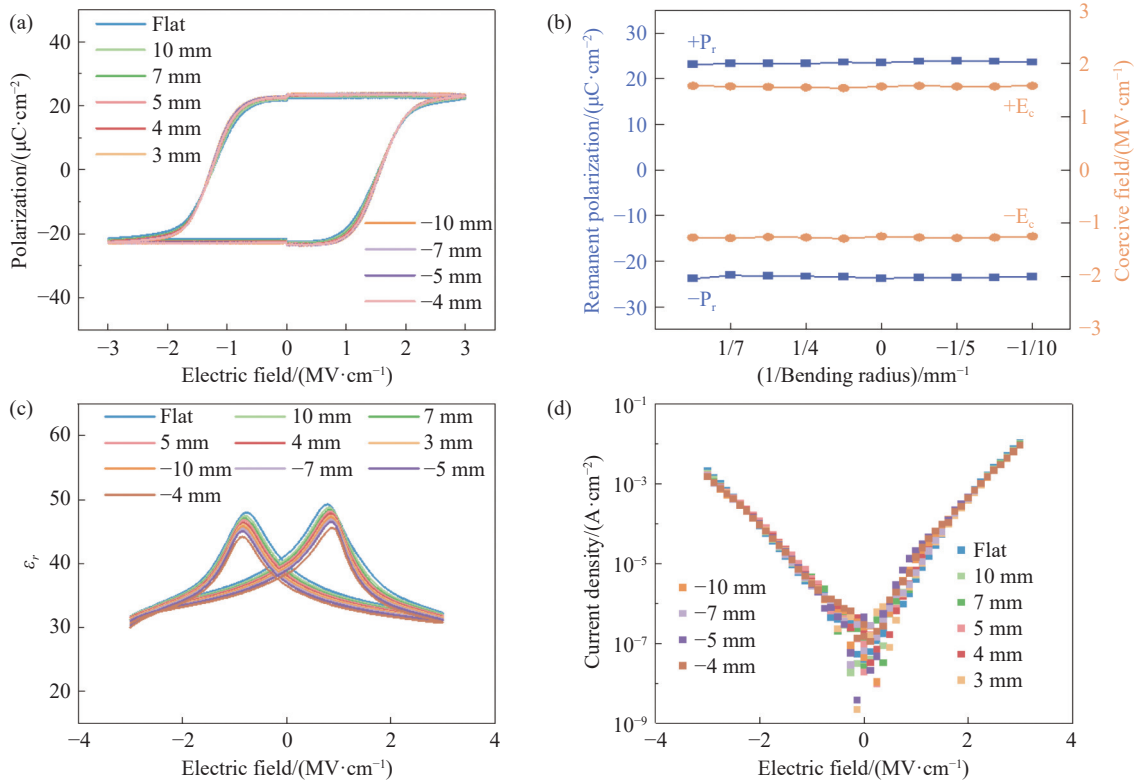

图 4　不同弯曲半径下器件的各项性能: (a)电滞回线(P-E); (b)剩余极化强度和矫顽场变化; (c)相对介电常数-电场(ε_r-E)关系曲线; (d)电流-电场(J-E) 特性

Fig. 4 Various properties of the devices at different bending radii: (a) electric hysteresis line (P-E); (b) the change of remnant polarization and coercive field; (c) relative permittivity-electric field (ε_r-E) relation curves; and (d) current-electric field (J-E) characteristics.

表 2 不同弯曲半径下的 $2P_r$、$\pm E_c$ 的数值范围及其相对标准差(RSD)

Table2 Range of values for different bending radii $2P_r$, $\pm E_c$, and relative standard deviations(RSD)

性能指标	数值范围	相对标准差(%)
$2P_r$ (μC/cm^2)	43.460～46.210	1.58
$+E_c$ (MV/cm)	1.540～1.541	0.76
$-E_c$ (MV/cm)	−1.242～−1.271	1.14

次数后，电滞回线也基本重合，并且具有很好的一致性。为了进一步评估剩余极化强度和矫顽场随弯曲次数的变化情况，我们提取出剩余极化强度与矫顽场随弯曲次数的变化，并且绘制在图 5(b)中。我们看到，在不同的弯曲次数下，剩余极化强度与矫顽场都具有很好的稳定性。表 3 列出了剩余极化强度与矫顽场变化的情况，$2P_r$、$+E_c$ 与 $-E_c$ 的相对标准差分别为 0.90%、0.26%与 0.60%，性能参数波动均很小。随后，我们还评估了不同弯曲次数下的 *J-E* 和 ε_r-*E* 曲线(如图 5(c)和(d)所示)。可以看出，器件在经历弯折后曲线并未发生明显变化，这说明了该器件抗弯曲性确实良好。

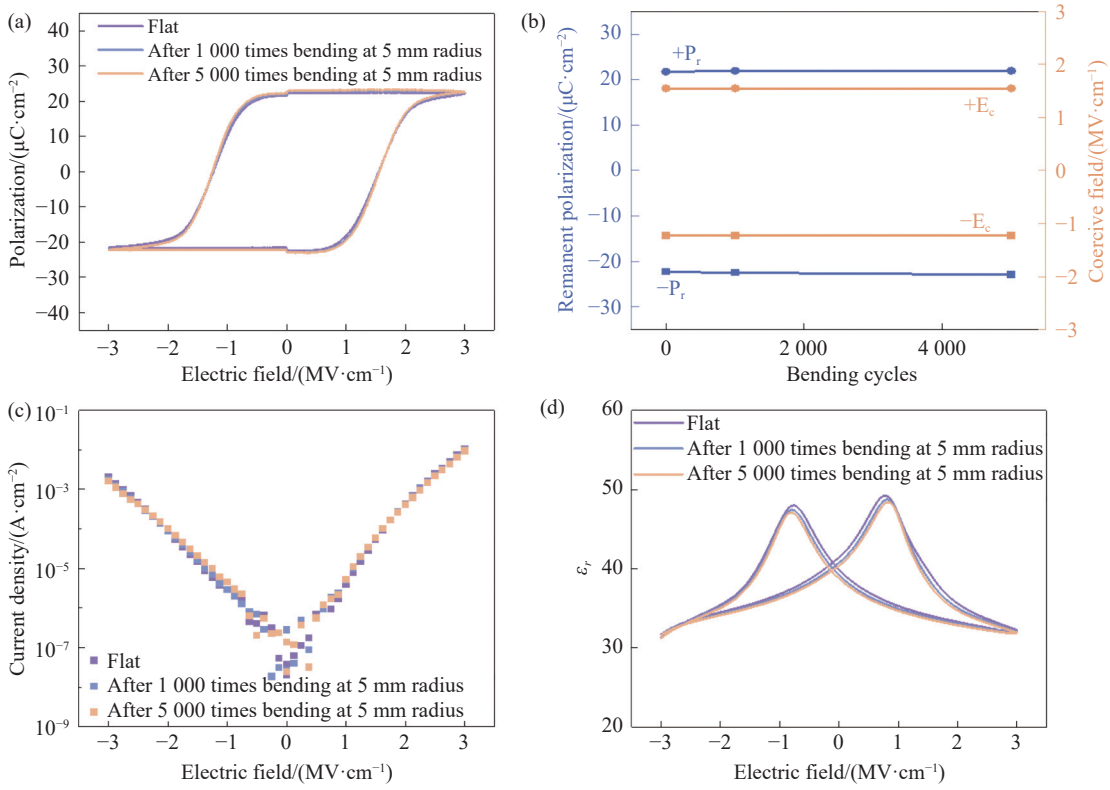

图 5 不同弯曲次数下的各项性能：(a)电滞回线(*P-E*)；(b)剩余极化强度和矫顽场变化；(c)电流-电压(*J-E*)特性曲线；(d)相对介电常数-电场(ε_r-*E*)关系曲线

Fig. 5 Various properties at different bending times: (a) hysteresis loops (*P-E*); (b) the change of polarization and coercive field; (c) *J-E* characteristics, and (d) relative permittivity-electric field (ε_r-*E*) curves.

2.3 器件性能分析

W/TiN/HZO/TiN/Al_2O_3/Mica 结构在弯曲状态下仍然能保持稳定的性能，这与膜层结构设计有很大的关系。研究表明，云母与 TiN 薄膜之间存在较大的应力[23]，这将导致直接沉积的 TiN 底电极开裂(如图 6(a)所示)。因此，为了实现更好的层间匹配进而降低应力，我们在 TiN 底电极与云母之间插入了 Al_2O_3 缓冲层。图 6(b)是插入缓冲层后的 TiN 的表面状态，该表面平坦且完整，未见开裂现象。此外，我们采用 SEM 对薄膜的表面形貌进行了表征。可以看出，TiN 薄膜直接沉积云母基底上时，出现了类似“电话线”形状的条纹(如图 7(a)所示)，继续放大可以看到薄膜产生了“褶皱”现象(如图 7(b)所示)。这一现象的产生，是由于基底与薄膜之间存在应力失配，从而导致了薄膜屈曲[24]。我们认为，薄膜屈曲现象聚集是导致弯曲时薄膜开裂的主要原因。从图 7(c-d)中可以看出，加入缓冲层后，薄膜屈曲现象消失，TiN 表面平坦且完整。

表 3　不同弯曲次数下 $2P_r$、$\pm E_c$ 的数值范围以及其相对标准差(RSD)

Table3 Range of values of $2P_r$, $\pm E_c$ and the relative standard deviation (RSD) for different numbers of bends

性能参数	数值范围	相对标准差(%)
$2P_r$ (μC/cm^2)	44.620～45.880	0.90
$+E_c$ (MV/cm)	1.553～1.556	0.26
$-E_c$ (MV/cm)	−1.234～−1.231	0.60

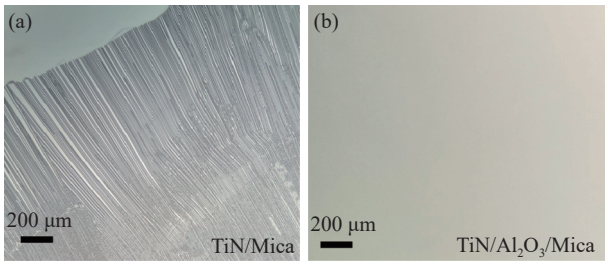

图 6　TiN 表面光学显微镜照片:(a)未加入缓冲层;(b)加入缓冲层

Fig. 6 Optical microscope photographs of TiN surface: (a) without buffer layer ; (b) with buffer layer.

这说明, 缓冲层确实能很好地解决底电极开裂的问题, 从而提高器件弯曲过程中性能的可靠性。此外,

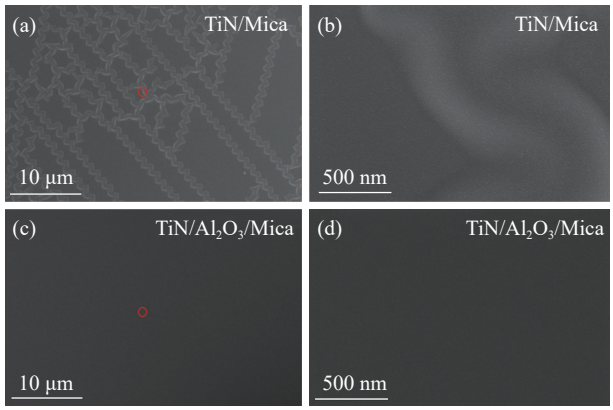

图 7　扫描电子显微镜(SEM)下的表面形貌: (a)TiN/Mica; (b)图(a)红圈区域的放大图; (c)TiN/Al_2O_3/Mica; (d)图(c)红圈区域的放大图

Fig. 7 Surface morphology under scanning electron microscope: (a) TiN/Mica; (b) magnification of the red circle region in (a); (c) TiN/Al_2O_3/Mica; (d) magnification of the red circle region in (c).

我们采用 AFM 测试了缓冲层对 TiN 底电极表面粗糙度的影响, 如图 8 所示。可以看出, 在加入缓冲层之后, 表面均方根粗糙度(R_q)由 0.590 nm 下降到 0.485 nm, 这说明缓冲层能降低表面粗糙度, 从而改善 HZO/TiN 界面状态。总之, Al_2O_3 缓冲层为后续高性能柔性铁电存储器的制备提供了良好的前提条件。

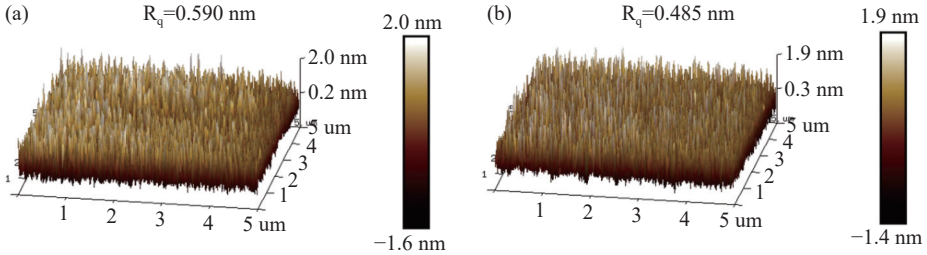

图 8　TiN 表面粗糙度:(a)未加入缓冲层;(b)加入缓冲层

Fig. 8 TiN surface roughness: (a) without buffer layer; (b) with buffer layer.

除了良好的稳定性, 该器件具有免“唤醒”特征, 并且二倍剩余极化强度高达 44 μC/cm^2。由于 HZO 具有单斜相、正交相、四方相以及立方相等多种相结构[25] 但仅正交相具有铁电性[26,27], 因此我们采用了掠入射式 X 射线衍射(GIXRD)对 HZO 晶相进行分析。从图 9 的 GIXRD 衍射谱图中, 我们可以发现一系列衍射峰, 这说明 HZO 薄膜呈现晶态。我们可以在 2θ 为~30.4°、~35.6°和~51.3°处发现明显衍射峰, 这些是正交相(111)、(002)和(220)的三强衍射峰位。虽然在这些峰附近也有其它非铁电相的存在, 但是考虑到器件具有良好的铁电性, HZO 薄膜中的正交相应具有较大占比, 这也是决

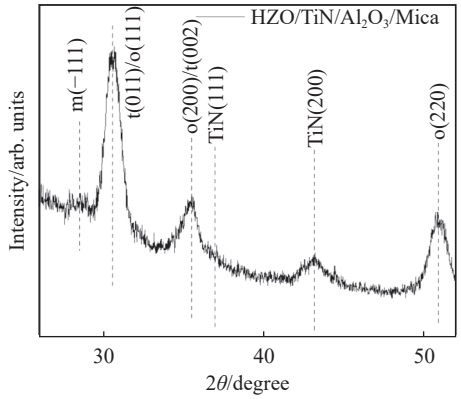

图 9　HZO 铁电薄膜 GIXRD 图谱

Fig. 9 GIXRD spectra of HZO ferroelectric thin films.

定器件良好铁电性的重要原因。

为了更加客观地评价器件的性能，我们将近年来使用直接沉积法制备的铪基柔性铁电存储器的各项性能汇总，并列于表 4。综合来看，我们所制备的器件在剩余极化强度、耐久性及弯曲稳定性等方面均表现良好。

表 4 柔性铪基铁电存储器各项性能汇总

Table4 Summary of flexible hafnium-based ferroelectric memory properties

基底	Mica	Mica	Mica	PET	Mica	Mica	PI	Mica	Mica
铁电材料	HZO	Ce:HfO_2	HZO	HZO	HZO	HZO	HZO	HZO	HZO
沉积方法	ALD	旋涂	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD	PLD
P_r ($\mu C/cm^2$)	22	16.5	11	20	16	12	21	25	22
耐久性	$>10^9$	$>10^8$	10^8	$>10^8$	10^7	10^8	10^8	10^7	10^7
缓冲层	Al_2O_3	N/A	N/A	N/A	Al_2O_3	N/A	Al_2O_3	N/A	N/A
最小弯曲半径(mm)	3	2.5	7.5	3	4	5	2	2	10
弯曲次数及所用半径(次)(mm)	5000 (5)	10000 (−5)	1000 (7.5)	1000 (9)	1000 (6)	N/A	5000 (2)	10000 (4)	10000 (10)
参考文献	本文	[18]	[6]	[17]	[11]	[9]	[13]	[14]	[8]

3 结论

我们成功制备了结构为 W/TiN/HZO/TiN/Al_2O_3/Mica 的柔性铁电存储器，该存储器具有免“唤醒”特征，循环擦写次数高于 10^9 次，且二倍剩余极化强度高达 44 $\mu C/cm^2$。各项性能参数在弯曲测试中均表现出非常小的波动，说明了该柔性 HZO 铁电存储器的弯曲稳定性。进一步的研究表明，Al_2O_3 缓冲层不仅能减少薄膜之间的应力失配，而且能改善 HZO/TiN 的界面状态，进而提升器件的弯曲稳定性。此外，HZO 内部正交相的占比较高，这可能是器件剩余极化强度高的主要原因。

本工作在福建省光伏行业技术开发基地完成，感谢团队负责人程树英教授提供的良好实验环境，同时感谢赖云锋教授为本文提供的研究思路、有益探讨和经费支持。

参考文献：

[1] Gao W, Emaminejad S, Nyein H Y Y, et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis[J]. Nature, 2016, 529(7587): 509-514.

[2] Ma C H, Jiang J, Shao P W, et al. Transparent anti-radiative ferroelectric heterostructure based on flexible oxide heteroepitaxy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(36): 30574-30580.

[3] Gao H, Yang Y, Wang Y, et al. Transparent, flexible, fatigue-free, optical-read, and nonvolatile ferroelectric memories[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(38): 35169-35176.

[4] Zheng M, Li X Y, Ni H, et al. van der Waals epitaxy for highly tunable all-inorganic transparent flexible ferroelectric luminescent films[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(27): 8310-8315.

[5] Ghoneim M T, Zidan M A, Alnassar M Y, et al. Thin PZT - based ferroelectric capacitors on flexible silicon for nonvolatile memory applications[J]. Advanced Electronic Materials, 2015, 1(6): 1500045.

[6] Xiao W, Liu C, Peng Y, et al. Thermally stable and radiation hard ferroelectric $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ thin films on muscovite mica for flexible nonvolatile memory applications[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2019, 1(6): 919-927.

[7] Xing Q, Pei M, Qiao L, et al. Noise robust reservoir computing based on flexible doped hafnium oxide memcapacitors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2024, 71(5): 2970-2975.

[8] Zhong H, Li M, Zhang Q, et al. Large-scale $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ membranes with robust ferroelectricity[J]. Advanced Material, 2022, 34(24): 2109889.

[9] Liu W Y, Liao J J, Jiang J, et al. Highly stable performance of flexible $Hf_{0.6}Zr_{0.4}O_2$ ferroelectric thin films under multi-service conditions[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(1):

3878-3886.

[10] Li Q. High-performance ferroelectric field-effect transistors with ultra-thin indium tin oxide channels for flexible and transparent electronics[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2686.

[11] Liu H, Lu T, Li Y, et al. Flexible Quasi - van der Waals ferroelectric hafnium - based oxide for integrated high - performance nonvolatile memory[J]. Advanced Science, 2020, 7(19): 2001266.

[12] Yu H, Chung C, Shewmon N, et al. Flexible inorganic ferroelectric thin films for nonvolatile memory devices[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(21): 1700461.

[13] Chen Y, Yang Y, Yuan P, et al. Flexible $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ ferroelectric thin films on polyimide with improved ferroelectricity and high flexibility[J]. Nano Research, 2022, 15(4): 2913-2918.

[14] Joh H, Jung M, Hwang J, et al. Flexible ferroelectric hafnia-based synaptic transistor by Focused-Microwave Annealing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(1): 1326-1333.

[15] Li Z, Wang T, Meng J, et al. Flexible aluminum-doped hafnium oxide ferroelectric synapse devices for neuromorphic computing[J]. Materials Horizons, 2023, 10(9): 3643-3650.

[16] Xu T, Xiang L, Xu M, et al. Excellent low-voltage operating flexible ferroelectric organic transistor nonvolatile memory with a sandwiching ultrathin ferroelectric film[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 8890.

[17] Liu B, Zhang Y, Zhang L, et al. Excellent HZO ferroelectric thin films on flexible PET substrate[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 919: 165872.

[18] Mo S T, Feng K M, Pang J L, et al. All-inorganic transparent $Hf_{0.85}Ce_{0.15}O_2$ ferroelectric thin films with high flexibility and stability[J]. Nano Research, 2023, 16(4): 5065-5072.

[19] Zhou X, Sun H, Li J. et al. A flexible $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ thin film with highly robust ferroelectricity[J]. Journal of Materiomics, 2024, 10(1): 210-217.

[20] Schroeder U, Park M H, Mikolajick T, et al. The fundamentals and applications of ferroelectric HfO_2[J]. Nature Reviews Materials, 2022, 7(8): 653-669.

[21] Zhou D, Xu J, Li Q, et al. Wake-up effects in Si-doped hafnium oxide ferroelectric thin films[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(19): 192904.

[22] Chang T J, Chen H Y, Wang C I, et al. Wake-up-free ferroelectric $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ thin films characterized by precession electron diffraction[J]. Acta Materialia, 2023, 246: 118707.

[23] Zhao F, Wang B, Cui X, et al. Buckle delamination of textured TiO_2 thin films on mica[J]. Thin Solid Films, 2005, 489(1-2): 221-228.

[24] Ni Y, Yu S, Jiang H, et al. The shape of telephone cord blisters[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 14138.

[25] Chen H, Tang L, Liu L, et al. Significant improvement of ferroelectricity and reliability in $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ films by inserting an ultrathin Al2O3 buffer layer[J]. Applied Surface Science, 2021, 542: 148737.

[26] Park M H, Lee Y H, Kim H J, et al. Understanding the formation of the metastable ferroelectric phase in hafnia–zirconia solid solution thin films[J]. Nanoscale, 2018, 10(2): 716-725.

[27] Liu C, Yang Q, Zeng B, et al. Orientation independent growth of uniform ferroelectric $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ thin films on silicon for high - density 3D memory applications[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(49): 2209604.