

【材料科学 / Materials Science】

高结晶取向原子级平整相变异质结薄膜的可控制备

丁科元, 钟名鉴, 车勇勇, 饶峰

深圳大学材料学院, 广东深圳 518055

摘要: 为了优化相变异质结 (phase-change heterostructure, PCH) 薄膜的结晶质量, 探索不同衬底和缓冲层对 Sb_2Te_3 薄膜生长的影响, 通过对比 Si、 SiO_2 和 Al_2O_3 衬底上生长的 Sb_2Te_3 薄膜的结晶特性, 引入 W 和 Ti 作为缓冲层, 发现将 Al_2O_3 衬底和约 10 nm 厚的 W 缓冲层相结合, 在保证薄膜取向一致性不变的情况下, 显著促进了 Sb_2Te_3 薄膜的高质量生长, 成功制备了具有几乎原子级平整度的高质量 PCH 薄膜. 该研究为高性能 PCH 材料的制备提供了重要的实验依据和理论支持.

关键词: 相变存储材料; 碲化锑; 异质结; 衬底; 缓冲层; 薄膜生长

中图分类号: TB34

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2026.01001

Controllable fabrication of highly crystalline and atomically flat phase-change heterostructure thin films

DING Keyuan, ZHONG Mingjian, CHE Yongyong, and RAO Feng

College of Materials Science and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518055, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: To optimize the crystalline quality of phase-change heterostructure (PCH) thin films and investigate the effects of different substrates and buffer layers on the growth of Sb_2Te_3 films, we systematically compared the crystalline properties of Sb_2Te_3 films deposited on Si, SiO_2 , and Al_2O_3 substrates. It was found that introducing W or Ti as a buffer layer significantly influences film growth. In particular, the combination of an Al_2O_3 substrate with W buffer layer approximately 10 nm-thick was shown to markedly promote the high-quality growth of Sb_2Te_3 films while preserving their orientation consistency. This approach enabled the successful fabrication of PCH films with near-atomic-level flatness. This study provides important experimental evidence and theoretical support for the preparation of high-performance PCH materials.

Key words: phase change materials; Sb_2Te_3 ; heterostructure; substrate; buffer layer; film growth

近年来, 人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的快速发展, 如 ChatGPT 和 DeepSeek 等产品的推出, 对数据存储与处理能力提出更高要求, 使存储技术成为支撑 AI 应用的关键环节. 相变存储器

(phase-change memory, PCM) 作为一种兼具高速、低功耗、高密度和非易失性特点的新型存储技术, 受到了学术界和产业界的广泛关注, 有望成为下一代通用型存储技术^[1-5]. PCM 的工作原理是基于相

Received: 2025-03-21; **Revised:** 2025-11-25; **Accepted:** 2025-12-01; **Online (CNKI):** 2025-12-31

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52032006, 52272159); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2020B1515120008, 2022B1515020072); Project of Department of Education of Guangdong Province (2021ZDZX1006); Science and Technology Foundation of Shenzhen (ZDSYS20210623091813040); Shenzhen University 2035 Program for Excellent Research (00000203)

Corresponding author: Professor RAO Feng (fengrao@szu.edu.cn)

Citation: DING Keyuan, ZHONG Mingjian, CHE Yongyong, et al. Controllable fabrication of highly crystalline and atomically flat phase-change heterostructure thin films [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(1): 1-6. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



<http://journal.szu.edu.cn>

变存储材料在外部电脉冲激励下的结构相变特性,当施加不同的电脉冲时,存储材料会在非晶态(高阻态)和晶态(低阻态)之间发生可逆转变,从而呈现出显著差异的电阻特性.这种电阻状态的差异性被用来表征二进制信息“0”和“1”,实现数据的非易失性存储.通过精确控制电脉冲参数,还可以实现多级存储,进一步提高存储密度.在高速存储方面,PCM具有较大潜力.已有研究表明,在Sc-Sb-Te相变材料体系中,稳定的富Sc晶核的形成显著降低了结晶过程中的形核随机性,这一特性使得材料能够在0.7 ns超短脉冲作用下实现可靠的可逆相变操作^[6].这一重要发现不仅为深入理解相变存储材料的快速结晶机制提供了新的视角,更为开发高性能缓存型PCM奠定了坚实的理论基础,并提供了关键的实验依据^[6-7].另一方面,兼具低功耗和高热稳定性的PCM因其优异的性能特征,被视为替代传统闪存技术的理想解决方案.以Sc-Sb相变材料体系为例,其独特的快速相变动力学特性和优异的数据保持能力,使其在嵌入式存储领域展现出显著的技术优势和应用潜力.特别是在物联网设备、移动终端等对功耗和可靠性要求严苛的应用场景中,Sc-Sb基PCM材料为实现高密度、非易失性存储提供了新的技术路径^[8].此外,PCM在类脑计算领域展现出独特的应用优势.特别值得关注的是,基于相变异质结(phase-change heterostructure, PCH)构建的PCM器件,凭借其优异的电学特性——超低的噪声水平和出色的抗阻值漂移性能,成功实现了高精度的多值存储和可靠的模拟计算功能.这一特性为突破传统冯·诺依曼计算架构的瓶颈提供了创新思路,不仅显著提升了神经形态计算系统的能效比,还为处理人工智能时代的海量数据计算任务提供了理想的硬件解决方案,有望推动新一代高效能、低功耗类脑计算系统的快速发展^[9-10].

PCH采用独特的层状结构设计,由相变材料子层和限制材料子层通过精确的交替堆叠构成^[11].其中,限制材料子层需要具备显著高于相变材料的熔点特性,以确保在高温操作条件下维持结构完整性,并将相变过程严格限制在二维平面尺度内.两个子层之间通过范德华力实现弱耦合连接,这种设计既能够有效增强相变材料子层的定向结晶特性,又可以防止在多次相变循环过程中发生材料互扩散,从而确保器件结构的长期稳定性.此外,原子级平整的异质界面能够最大限度地降低界面缺陷密

度和电荷散射效应,显著提升载流子传输的稳定性.因此,为了实现优异的器件性能和可靠的结构一致性,PCH结构需要满足3个关键要求:高结晶质量、类范德华外延式的结晶取向控制,以及原子级界面平整度.

以六方晶相的 Sb_2Te_3 作为相变材料子层为例,其与具有相同晶体结构的 TiTe_2 (熔点约1 200 °C,显著高于 Sb_2Te_3 的620 °C)构成理想的异质结体系. TiTe_2 作为限制层不仅满足高温稳定性要求,其与 Sb_2Te_3 的高度晶格匹配特性更有利于实现高质量的异质外延生长.这种材料组合通过精确控制薄膜生长条件,可获得具有特定结晶取向的高质量界面,从而确保异质结的结构稳定性和性能一致性.

PCH的制备过程需要精确调控多个关键工艺参数,包括溅射腔体压强、薄膜生长温度、溅射靶材的电源功率以及基底材料(如衬底和缓冲层)的选择等^[12-15].其中,基底材料作为PCH外延生长的模板,对异质结的结晶质量和取向一致性起着决定性作用.本课题组前期研究发现,通过优化种子层可以有效提升薄膜的取向一致性,显著改善疲劳循环寿命^[16].

针对 $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{TiTe}_2/\cdots/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 形式堆垛的异质结结构,仅有最底层的作为种子层的 Sb_2Te_3 薄膜与衬底(或缓冲层)直接接触,而上层的 TiTe_2 及其他 Sb_2Te_3 层均是在已形成的晶体层上外延生长的.种子层的生长质量直接决定了后续所有异质结薄膜的外延生长的最终质量.本研究深入探究基底材料对 Sb_2Te_3 薄膜结晶特性的影响机制.首先,通过对比分析Si、 SiO_2 和 Al_2O_3 三种典型衬底上原位生长 Sb_2Te_3 薄膜的结晶质量,筛选出较好的衬底材料;随后,在此基础上引入W和Ti作为缓冲层,系统评估其对薄膜晶体取向和界面质量的影响规律.

1 实验部分

本实验采用了磁控溅射的方法制备 Sb_2Te_3 、 TiTe_2 、钨(W)、钛(Ti)以及 SiO_2 薄膜.溅射腔内的本底真空压强为 1.3×10^{-5} Pa,溅射时的真空压强保持0.63 Pa.实验中采用3种不同的衬底:Si衬底为(1 0 0)晶面的单抛片; SiO_2 衬底通过在(1 0 0)晶面的单抛硅片上进行热氧化工艺制备,表面热氧化层厚度约为500 nm; Al_2O_3 衬底则为(0 0 1)晶面的单抛片.采用X射线荧光光谱仪(X-ray fluores-

cence spectroscopy, XRF)表征薄膜组分. 采用原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)确定薄膜厚度以及表征样品表面形貌. 采用X射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)表征薄膜晶体结构, 2θ 扫描范围为 $10^\circ \sim 60^\circ$, 扫描步长 0.02° , 且以铜(Cu)靶材产生的 K_α 辐射作为X射线源. 获得的PCH薄膜通过聚焦离子束(focused ion beam, FIB)制备出可以用于透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)观察的样品. 采用美国Thermo Fisher Scientific公司生产的Spectra 200型球差校正TEM观察具有原子级分辨率的扫描透射-高角环形暗场像(scanning TEM - high angle annular dark field, STEM-HAADF).

2 结果与讨论

2.1 优选出获得 Sb_2Te_3 高结晶质量的衬底材料

为避免 TiTe_2 子层因其优异的导电性与底电极直接接触形成虚拟电极, 从而对器件性能产生不利影响, 本研究采用了一种创新的结构设计: 将 Sb_2Te_3 子层置于PCH结构的底层. 这种设计不仅有效隔离了 TiTe_2 子层与底电极的直接接触, 还为后续异质结的生长提供了理想的模板. 作为PCH结构中的首层生长材料, Sb_2Te_3 薄膜的结晶质量对后续 TiTe_2 子层的异质外延生长具有重要影响, 其晶体取向、表面平整度和界面质量直接决定了整个PCH器件的性能表现. 因此, 本研究首先研究 Sb_2Te_3 在不同衬底(包括Si、 SiO_2 和 Al_2O_3)上的结晶动力学行为.

实验采用两步法制备 Sb_2Te_3 薄膜. 首先, 在室温条件下沉积约5 nm的 Sb_2Te_3 作为种子层; 随后升温至 300°C 并保温1 h, 之后在 300°C 恒定温度下进行原位生长 Sb_2Te_3 薄膜, 最终 Sb_2Te_3 薄膜总厚度达到约100 nm. 为有效防止薄膜氧化, 所有样品在降温至室温后均沉积约10 nm的非晶 SiO_2 薄膜作为保护层. 利用X射线衍射技术对Si、 SiO_2 和 Al_2O_3 三种不同衬底上制备的 Sb_2Te_3 薄膜进行结晶质量表征, 结果如图1所示.

根据图1的XRD结果分析, 所有衬底(Si、 SiO_2 和 Al_2O_3)上生长的 Sb_2Te_3 薄膜均表现出六方晶相结构, 且衍射峰仅对应(0 0 l)晶面, 表明薄膜具有单一的晶体结构和高度一致的取向性, 晶粒排列高度有序. 然而, 不同衬底上衍射峰强度存在显著差

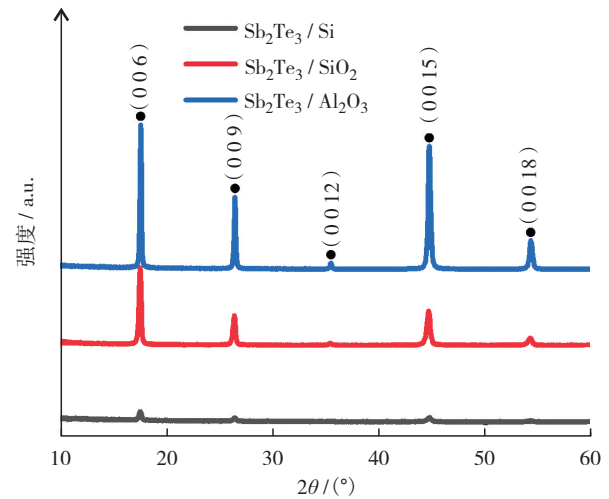


图1 在3种不同衬底(Si、 SiO_2 和 Al_2O_3)上获得的 Sb_2Te_3 薄膜样品的XRD曲线

Fig. 1 The XRD patterns of Sb_2Te_3 thin films grown on Si (black), SiO_2 (red), and Al_2O_3 (blue) substrates.

异, 其中, Al_2O_3 衬底上生长的 Sb_2Te_3 薄膜衍射峰最强, Si衬底上最弱. 以(0 0 6)晶面为例, Si、 SiO_2 和 Al_2O_3 衬底上衍射峰强度之比约为1:9:17, 表明 Al_2O_3 衬底上生长的 Sb_2Te_3 薄膜在具有优异的结晶取向一致性的基础上, 还具备晶粒尺寸大的特点.

为深入探究不同衬底上 Sb_2Te_3 薄膜结晶行为差异的形成机制, 采用AFM对3种衬底在薄膜生长前的表面形貌进行了表征(图2). 研究表明, Si衬底表面存在显著的选择性化学键合行为: Si与Te原子间表现出较强的化学键合倾向, 而Sb与Si的键合能力相对较弱. 这种选择性键合机制导致在Si衬底表面自发形成Te终止面, 为 Sb_2Te_3 薄膜的范德华外延生长提供了理想的模板, 从而促进了高结晶质量和高取向一致性薄膜的形成^[17].

从图2的AFM测试结果可以看出, 与 SiO_2 和 Al_2O_3 衬底相比, 本研究所使用的Si衬底表面粗糙度最大, 其均方根粗糙度(R_q)达到了0.79 nm.

鉴于 SiO_2 和 Al_2O_3 衬底无需施加反向偏压即可避免表面自发氧化层的形成, 为保持实验条件的一致性, 本研究对Si衬底同样未进行去除自发氧化层的特殊处理. 因此, Si衬底表面保留了其固有的自发氧化层. 值得注意的是, 自发氧化过程形成的氧化硅层表面粗糙度通常高于采用热氧化工艺制备的氧化硅层. 尽管在氧化物衬底上制备沿 c 轴取向生长的 Sb_2Te_3 薄膜是可行的^[18], 然而, 本研究中Si衬底表面较高的粗糙度会引入更多的成核位点, 增加晶界密度, 阻碍晶粒的定向生长, 导致晶粒尺寸减

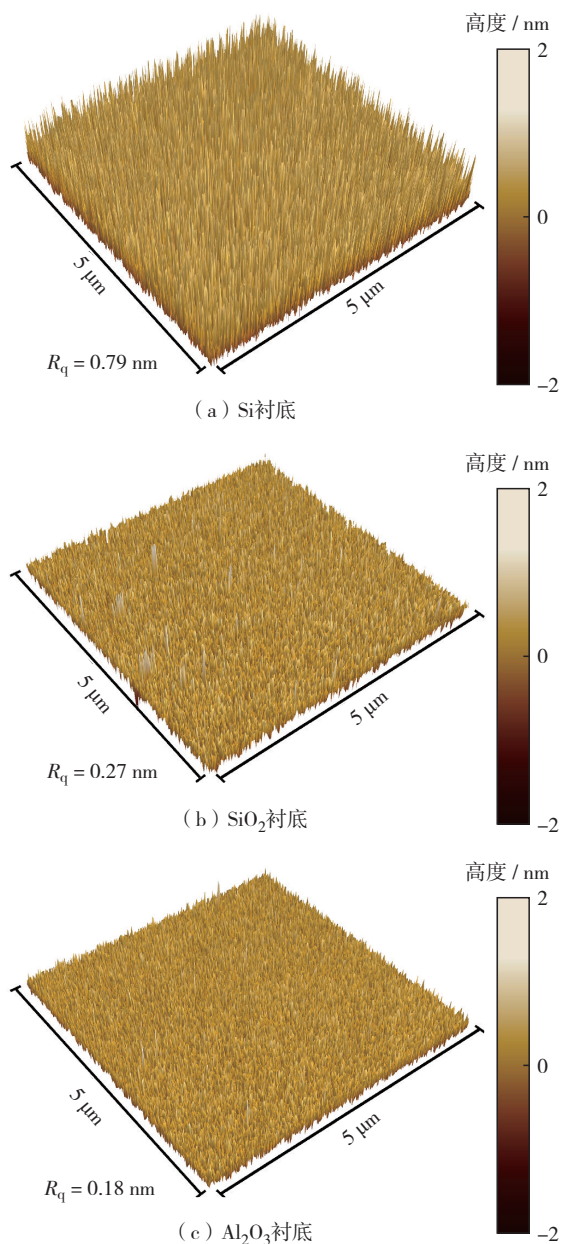


图2 Si、SiO₂和Al₂O₃衬底的AFM表征结果

Fig. 2 AFM views of (a) Si, (b) SiO₂ and (c) Al₂O₃ substrates.

小, 进而导致XRD衍射峰强度较弱. Al₂O₃衬底不仅具有更低的表面粗糙度, 其晶态表面结构能够提供明确的晶格匹配位点, 这有利于诱导Sb₂Te₃薄膜的定向结晶, 从而促进更大晶粒尺寸的形成, 表现出更强的XRD衍射峰强度. 相比之下, 非晶态SiO₂衬底由于缺乏长程有序的晶格结构, 无法提供有效的晶格诱导作用, 导致薄膜结晶过程中晶粒尺寸较小, XRD衍射峰强度相对较弱.

2.2 优选出获得Sb₂Te₃高结晶质量的缓冲层材料

在优选出Al₂O₃衬底后, 本研究进一步分析了在衬底上室温沉积1层约10 nm的缓冲层(Ti或W)

对Sb₂Te₃薄膜结晶质量的影响, 如图3所示.

从图3可知, 不同缓冲层上制备的Sb₂Te₃薄膜均表现出六方晶相结构, 且衍射峰仅对应(0 0 *l*)晶面, 表明薄膜内部晶体结构单一, 取向一致性高, 晶粒排列高度有序. 然而, 引入Ti缓冲层会降低Sb₂Te₃薄膜的衍射峰强度, 而W缓冲层则显著提升了衍射峰强度. 这种差异可归因于缓冲层与Sb₂Te₃之间不同的界面相互作用机制. 具体而言, Ti与Sb和Te均倾向于形成化学键, 这可能导致界面处缺陷增多并限制晶粒生长, 从而削弱衍射峰强度. 相比之下, W优先与Te成键, 而几乎不与Sb反应, 这种选择性键合促进了Te终止表面的形成, 进而诱导Sb₂Te₃薄膜按照Te、Sb、Te、Sb和Te的顺序逐层生长, 形成更大的晶粒和更强的衍射峰^[15]. 研究揭示了缓冲层材料与Sb₂Te₃之间的选择性键合机制对薄膜结晶质量的重要调控作用, 并证实了W缓冲层在优化Sb₂Te₃薄膜结晶特性和界面质量方面的显著优势.

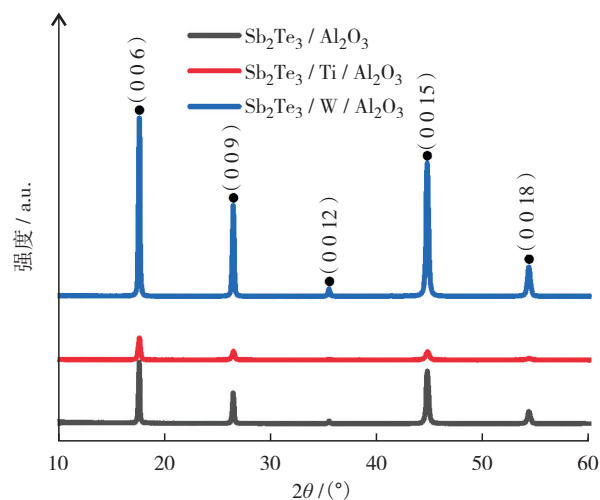


图3 在Al₂O₃衬底上分别增加Ti和W缓冲层后制备的Sb₂Te₃薄膜样品的XRD曲线

Fig. 3 The XRD patterns of Sb₂Te₃ thin films grown on Al₂O₃ substrate with no buffer layer (black), a Ti buffer layer (red), and a W buffer layer (blue).

2.3 高质量PCH电子显微分析

基于上述研究结果, 制备了以W/Al₂O₃为基底, 由Sb₂Te₃和TiTe₂子层交替堆垛构成的PCH. 为了在原子尺度表征薄膜微观结构并验证W/Al₂O₃组合对PCH薄膜取向性和结晶度的提升效果, 利用球差校正扫描透射电子显微镜的STEM-HAADF模式, 观测到样品中的原子排列结构, 结果如图4.

从图4可见, 紧邻W缓冲层生长的Sb₂Te₃子层

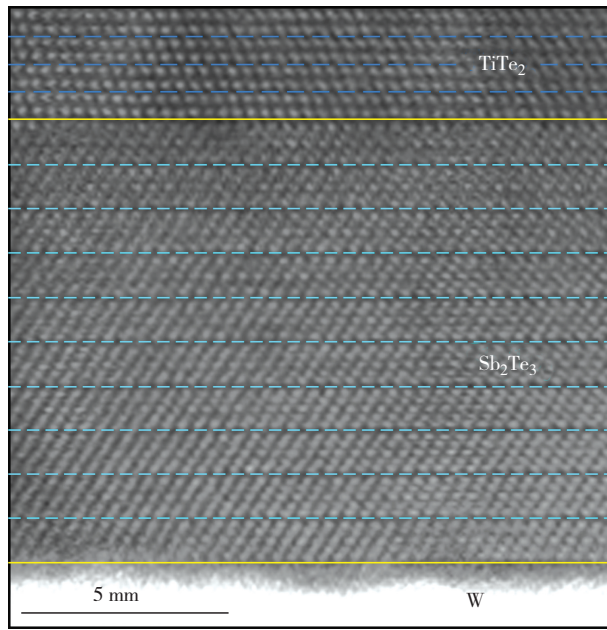


图4 在 Al_2O_3 衬底上沉积W缓冲层后制备的PCH薄膜横截面样品的STEM-HAADF照片

Fig. 4 Cross-sectional STEM-HAADF image of the PCH thin film prepared on an Al_2O_3 substrate with a W buffer layer. All the van der Waals layers are parallel to the substrate.

的范德华层平行于衬底, 结晶度较高, 几乎达到原子级平整度, 同时后续的几个 Sb_2Te_3 的5原子层结构也延续了该生长行为. 从图4还可以看出, Sb_2Te_3 子层内部为单晶结构, 原子排列具有周期性. 这一特性不仅为后续 TiTe_2 子层薄膜沿 c 轴的高质量类外延生长提供了理想条件, 使得后续生长的 TiTe_2 子层沿 $[0\ 0\ 1]$ 晶向生长, 而且在保持高结晶质量和平整度的同时, 使单个器件单元的电输运性能更为稳定.

高质量的PCH结构也确保了 Sb_2Te_3 在可逆相变过程中具有明确的定向取向性^[9], 减少了相变随机性, 同时 TiTe_2 子层将 Sb_2Te_3 的相变过程限制在2维空间内, 抑制原子长程扩散^[8], 从而显著提升了存储器的稳定性和一致性, 为高精度计算应用奠定了坚实的物理基础.

结 语

通过比较Si、 SiO_2 和 Al_2O_3 三种衬底上制备的 Sb_2Te_3 薄膜的XRD表征结果, 确定 Al_2O_3 为较佳的衬底材料. 进一步在 Al_2O_3 衬底上沉积Ti和W缓冲层的研究表明, W缓冲层能够显著提升 Sb_2Te_3 薄膜的结晶质量. 基于上述发现, 采用 Al_2O_3 衬底与W

缓冲层相结合的材料体系, 成功制备出具有近原子级表面平整度的高质量PCH样品. 这一研究成果不仅为高性能PCH材料的可控制备提供了重要的实验依据和理论指导, 同时也为后续功能器件的开发奠定了坚实的材料基础.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52032006, 52272159); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2020B1515120008, 2022B1515020072); 广东省教育厅资助项目(2021ZDZX1006); 深圳市科技基金资助项目(ZDSYS20210623091813040); 深圳大学2035卓越研究计划资助项目(00000203)

作者简介: 丁科元(kyting@szu.edu.cn), 深圳大学教授. 研究方向: 相变信息存储材料与器件.

引 文: 丁科元, 钟名鉴, 车勇勇, 等. 高结晶取向原子级平整相变异质结薄膜的可控制备[J]. 深圳大学学报理工版, 2026, 43(1): 1-6.

参考文献 / References:

- [1] LIU Qianchen, WEI Tao, ZHENG Yonghui, et al. Picosecond operation of optoelectronic hybrid phase change memory based on Si-doped Sb films [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(11): 2417128.
- [2] YANG Zhe, LI Bowen, WANG Jiangjing, et al. Designing conductive-bridge phase-change memory to enable ultralow programming power [J]. Advanced Science, 2022, 9(8): 2103478.
- [3] 吴卫华, 马文静, 徐胜卿, 等. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 相变存储单元电热耦合模型的构建及功耗分析[J]. 江苏理工学院学报, 2024, 30(6): 1-6.
WU Weihua, MA Wenjing, XU Shengqing, et al. Construction and power consumption analysis of electrothermal coupling model of phase-change storage unit based on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [J]. Journal of Jiangsu University of Technology, 2024, 30(6): 1-6. (in Chinese)
- [4] 石红春, 刘晓华, 朱晨阳, 等. 硫系化合物在相变存储器中的应用概述[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊1): 99-103.
SHI Hongchun, LIU Xiaohua, ZHU Chenyang, et al. Overview of the application of chalcogenide compounds in phase change memory [J]. Materials Reports, 2023, 37 (Suppl. 1): 99-103. (in Chinese)
- [5] 沈雪阳, 褚瑞轩, 蒋宜辉, 等. 相变存储器材料设计与多尺度模拟的研究进展[J]. 金属学报, 2024, 60(10): 1362-1378.
SHEN Xueyang, CHU Ruixuan, JIANG Yihui, et al. Progress on materials design and multiscale simulations for

- phase-change memory [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2024, 60(10): 1362-1378. (in Chinese)
- [6] RAO Feng, DING Keyuan, ZHOU Yuxing, et al. Reducing the stochasticity of crystal nucleation to enable subnanosecond memory writing [J]. *Science*, 2017, 358(6369): 1423-1427.
- [7] DING Keyuan, CHEN Bin, CHEN Yimin, et al. Recipe for ultrafast and persistent phase-change memory materials [J]. *NPG Asia Materials*, 2020, 12(1): 63.
- [8] WANG Xuepeng, CHEN Bin, GONG Huang, et al. Special kinetics features of scandium antimonide thin films conducive to swiftly embedded phase-change memory applications [J]. *Science China Materials*, 2024, 67(11): 3684-3691.
- [9] DING Keyuan, WANG Angngjing, ZHOU Yuxing, et al. Phase-change heterostructure enables ultralow noise and drift for memory operation [J]. *Science*, 2019, 366(6462): 210-215.
- [10] WANG Xu, DING Keyuan, SHI Mengchao, et al. Unusual phase transitions in two-dimensional telluride heterostructures [J]. *Materials Today*, 2022, 54: 52-62.
- [11] 郑龙, 薛建忠, 裴明旭, 等. 可用于数据存储的 Nb-Sb₂Te₃/C 超晶格结构相变材料的研究[J]. *江苏理工学院学报*, 2025, 31(1): 80-86.
- ZHENG Long, XUE Jianzhong, PEI Mingxu, et al. Research on Nb-Sb₂Te₃/C superlattice phase change materials for data storage [J]. *Journal of Jiangsu University of Technology*, 2025, 31(1): 80-86. (in Chinese)
- [12] SAITO Y, FONS P, BOLOTOV L, et al. A two-step process for growth of highly oriented Sb₂Te₃ using sputtering [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(4): 045220.
- [13] SAITO Y, MITROFANOV K V, MAKINO K, et al. Sputter growth of chalcogenide superlattice films for future phase change memory applications [J]. *ECS Transactions*, 2018, 86(3): 49-54.
- [14] BEHERA J K, ZHOU Xilin, TAI Bo, et al. Design of *c*-axis-oriented pnictogen chalcogenides [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(7): 3114-3122.
- [15] BEHERA J K, ZHOU Xilin, RANJAN A, et al. Sb₂Te₃ and its superlattices: optimization by statistical design [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(17): 15040-15050.
- [16] DING Keyuan, LI Tianci, CHEN Bin, et al. Reliable 2D phase transitions for low-noise and long-life memory programming [J]. *Frontiers in Nanotechnology*, 2021, 3: 649560.
- [17] SAITO Y, FONS P, KOLOBOV A V, et al. Self-organized van der Waals epitaxy of layered chalcogenide structures [J]. *Physica Status Solidi B*, 2015, 252(10): 2151-2158.
- [18] HIPPERT F, KOWALCZYK P, BERNIER N, et al. Growth mechanism of highly oriented layered Sb₂Te₃ thin films on various materials [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(15): 154003.

【中文责编：坪梓；英文责编：远鹏】