

二硫化锡纳米片阻变存储器的制备与性能

赵婷^{1,3} 坚佳莹^{*,2,3} 董芃凡^{1,3} 冯浩^{1,3} 南亚新^{1,3} 常芳娥¹

(¹西安工业大学材料与化工学院, 西安 710021)

(²西安工业大学电子信息工程学院, 西安 710021)

(³陕西省光电功能材料与器件重点实验室, 西安 710021)

摘要: 采用水热法合成了尺寸为50~100 nm的二硫化锡纳米片,并首次以二硫化锡作为阻变层材料的阻变存储器(Cu/PMMA/SnS₂/Ag, PMMA=聚甲基丙烯酸甲酯),对其阻变性能进行了研究。结果表明: Cu/PMMA/SnS₂/Ag阻变存储器的开关比约10⁵,耐受性2.7×10³。在上述2项性能指标达到较优水平的同时,开态与关态电压分别仅约为0.28与-0.19 V。

关键词: 阻变存储器; 二硫化锡; 低操作电压

中图分类号: O614.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-4861(2021)11-2020-09

DOI: 10.11862/CJIC.2021.235

Preparation and Properties of Resistive Random Access Memory Based on Tin Disulfide Nanosheets

ZHAO Ting^{1,3} JIAN Jia-Ying^{*,2,3} DONG Peng-Fan^{1,3} FENG Hao^{1,3} NAN Ya-Xin^{1,3} CHANG Fang-E¹

(¹School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(²School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(³Shaanxi Key Laboratory of Optoelectronic Functional Materials and Devices, Xi'an 710021, China)

Abstract: Here, SnS₂ nanosheets with the size of 50-100 nm were synthesized by hydrothermal method, and was used as the resistive layer material (Cu/PMMA/SnS₂/Ag, PMMA=polymethyl methacrylate) for the first time. The results showed that the ON/OFF ratio of Cu/PMMA/SnS₂/Ag resistive random access memory was about 10⁵, and the endurance was 2.7×10³. The on-state voltage and off-state voltage were only about 0.28 and -0.19 V, respectively.

Keywords: resistive random access memory; tin disulfide; low operating voltage

0 引言

随着云服务、智能手机、平板电脑等信息技术的快速发展,人们对高性能、高密度、低功耗、短访问时间的存储设备的需求日益迫切^[1]。目前为止,基于新材料和结构设计的突破已经很多,如铁电存储器(ferroelectric random access memory, FRAM)和阻变存储器(resistant random access memory, RRAM)^[2-6]。

其中,由于RRAM具有简单的夹层结构、高的存储密度和优异的耐久性等诸多优点,被认为是下一代非易失性存储器的理想选择^[7-9]。RRAM由上下2个金属电极(如Cu、Ag)与中间的阻变层组成。在一些阻变层材料中,如金属氧化物(TiO₂、NiO、HfO₂、ZnO、Fe₂O₃、多铁磁BiFeO₃)、二维过渡金属硫族半导体材料(MoS₂、MoSe₂、WS₂、WSe₂)、有机半导体、复合微粒子等中都有阻变现象发生^[10-17]。

收稿日期: 2021-05-17。收修改稿日期: 2021-09-07。

国家自然科学基金(No.51971166)资助。

*通信联系人。E-mail: jianjiaying@xatu.edu.cn

研发合适的阻变介质材料来改善阻变存储器的特性是一个重要的研究方向。二维过渡金属硫族半导体材料(transition-metal dichalcogenide, TMDs)具有以下优点:层内拥有强的共价键,而层间存在较弱的范德瓦尔斯力,这使得TMDs可以很容易剥离,同时材料的层数与电子性质密切相关,层数不同会导致二维材料的带隙有所差异;单层二维材料的厚度小于1 nm,这对半导体产业的高密度集成有很大的优势;TMDs优异的柔韧性和抗弯曲性使其在柔性电子器件中也有很好的应用^[17-18]。Zhai等报道了一种以MoS₂-UCNPs纳米材料作为活性层的RRAM器件,其表现出一定的存储性能,但器件的工作电压(±5 V)较高,无法实现低功耗应用^[19]。Sun等研究了掺杂氟锡氧化物(FTO)和Ag之间的MoS₂单层的双极电阻开关效应,尽管该器件工作电压为±0.43 V,开关比为10³,但器件的耐受性(10²)较低,不能保证器件在经过多次编程和擦除之后仍可保持高的可靠性^[20]。Choi等报道了一种具有ITO/PI-GO/Al结构的RRAM,开关比可达到10⁸,但其工作电压(2.65 V)较高,且耐受性(10²)偏低^[21]。Snigdha等研究了聚甲基丙烯酸甲酯-MoS₂(聚甲基丙烯酸甲酯=PMMA)的阻变特性,虽然该器件具有良好的开关比(10³)与超高的耐受性(10⁵),但工作电压(2.5 V)偏高,能耗大^[22]。可见,RRAM同时满足限制电流低于10⁻³ A、工作电压低于0.3 V、开关比高于10⁵与耐受性高于10³的器件还鲜有报道^[23]。

因此,通过引入新的材料体系,有望加快推进低功耗、高性能的RRAM的研究。其中,二硫化锡(SnS₂)作为一种新型二维层状半导体材料,能带间隙约为2.2 eV,其自然储量丰富且对环境无污染^[24]。迄今为止,将SnS₂应用于存储器,尤其是直接将其作为阻变层材料的研究工作还未见报道,阻变机制也尚不明确。

PMMA是一种无毒、生物相容、环境友好、廉价且无害的光伏活性有机高分子聚合物材料,非常适合涂覆在二维材料表面以形成高度均匀的薄膜^[22]。我们选择PMMA作为绝缘介质材料和支撑层,主要研究了水热法合成SnS₂纳米片的结构性能,并制备了Cu/PMMA/SnS₂/Ag结构的RRAM,该存储器的开态电压约0.3 V,关态电压约-0.2 V,开关比约10⁵,2.7×10³次循环扫描后高低阻仍具有超高稳定性的阻变性能。该器件对于开发高性能柔性电子存储器件有着重要意义。

1 实验部分

1.1 SnS₂的制备与表征

采用水热法合成SnS₂纳米片。首先称取5.0 mmol的五水合四氯化锡(SnCl₄·5H₂O)和12.5 mmol的硫代乙酰胺(CH₃CSNH₂)溶解在70 mL去离子水中,滴加冰乙酸后均匀搅拌。将搅拌好的溶液转移至聚四氟乙烯衬里的不锈钢高压反应釜内,密封好,放入电热恒温鼓风干燥箱中,200 ℃反应12 h。自然冷却至室温,利用去离子水和无水乙醇反复超声洗涤数次,60 ℃真空烘干,即可得到SnS₂纳米片。

在室温下,通过X射线衍射(XRD,布鲁克D2 PHASER Gen2)表征SnS₂的晶体结构,仪器参数:Cu K α 射线,波长为0.154 06 nm,电压和电流分别为30 kV和10 mA,扫描范围为10°~90°。采用透射电子显微镜(TEM, JEM2010)与高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)表征SnS₂的微观形貌,加速电压可达200 kV,最小束斑为1 nm。采用X射线光电子能谱(XPS)表征SnS₂的化学状态。采用共聚焦显微拉曼光谱分析仪(Raman, LabRAM HR Evolution)表征SnS₂的晶体质量和纯度,测试范围100~500 nm。采用稳态瞬态荧光光谱仪(PL, Quanta Master8000)表征SnS₂的荧光状态,测试范围440~510 nm。采用紫外可见光分光光度计(SHIMADZU, UV-2600)得到有关SnS₂的禁带宽度,测试范围300~900 nm。

1.2 Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM的制备与性能测试

首先,先将2 mm厚、20 mm×20 mm的玻璃衬底置于丙酮溶液中超声清洗15 min,再把衬底置于无水乙醇中超声清洗15 min,最后将衬底置于去离子水中超声清洗15 min,放入真空干燥箱内烘干。采用真空热蒸发镀膜法在清洗过的玻璃基底上蒸镀银金属衬底薄膜。其次,将水热法制备的SnS₂以0.01 g·mL⁻¹的浓度分散在N,N-二甲基甲酰胺中,然后超声分散得到SnS₂悬浮液。之后,在银金属衬底上采用真空抽滤法制备一层SnS₂薄膜,并将该器件放在匀胶机样品托的中心位置,把PMMA溶液滴涂在SnS₂薄膜上,设置转速和旋涂时间,启动匀胶机。最后,采用硬掩模热蒸镀工艺将Cu金属沉积在PMMA薄膜表面,以获得具有一定厚度的Cu顶电极。在室温下,利用吉时利(Keithley)4200-SCS半导体特性分析仪对制备好的器件进行伏安特性(I-V曲线)测试,其中Cu和Ag分别是顶电极和底电极。

2 结果与讨论

2.1 SnS₂的结构与性能表征

样品的晶体结构和晶相纯度利用XRD进行表征。图1a为SnS₂的XRD图,图中的主要衍射峰都能与标准卡片中的六方相SnS₂(PDF No.23-677)对应,这表明样品为六方相SnS₂。此外,XRD图中主要衍射峰尖锐,没有除SnS₂之外的衍射峰,说明水热合成的SnS₂纯度高、结晶性好。

图1b为SnS₂样品的TEM图,由图可知,通过水热法制备的SnS₂样品呈片状结构,厚度均匀,边界明显,分散均匀,无团聚现象且这些片状有着比较规则的六边形,片状尺寸大小为50~100 nm。而图1c为SnS₂样品的HRTEM图,可以更加清晰地看到每个SnS₂片由40层左右的S-Sn-S单层片组装而成,且层厚均匀,层与层之间的间距约0.62 nm。由图1d可以明显观察到其晶格条纹,测得晶面间距约0.33 nm,对应六方相SnS₂的(100)晶面,该结果与文献报道的理论值相接近^[25]。上述结果表明,水热法制备的SnS₂已经达到纳米级别的厚度与尺寸。

利用XPS研究了SnS₂样品的化学组成和键合结

构,其结果如图2a、2b所示。由于Sn元素强烈的自旋轨道分裂,Sn3d_{5/2}和Sn3d_{3/2}的2个主要能级峰分别位于486.59和495.03 eV,如图2a所示,Sn的自旋轨道分裂能约8.44 eV,是SnS₂中Sn⁴⁺轨道的典型值^[26]。而S2p_{3/2}和S2p_{1/2}的2个主要能级峰分别位于161.94和163.03 eV,如图2b所示,S的自旋轨道分裂能约为1.09 eV,因此S元素的自旋轨道分裂能很小。对于确定的S元素而言,正是因其分裂能相对较弱,在XPS测试中易发生耦合现象^[27]。

拉曼光谱利用来自激光器同色光的不可弯曲散射,根据激光与系统振动的相互作用使光子的能量上下移动,可用于定量分析SnS₂中存在的层数。为了防止样品分解,采用低功率激光。图2c为SnS₂的拉曼光谱图,图中仅观察到一个位于314 cm⁻¹处的拉曼特征峰,这与SnS₂的A_{1g}光学声子模式相对应,表明其少量层状结构的存在,进一步证实了SnS₂纳米片具有更高的晶体质量和纯度,而高结晶度的材料具有高度局域化的传输机制和巨大的固有电荷载流子迁移率,因此生长的SnS₂非常适合应用于光电器件^[28]。与此同时,A_{1g}的峰是仅由S原子沿c轴相对于彼此的面外振动引起的,表明制备的SnS₂的

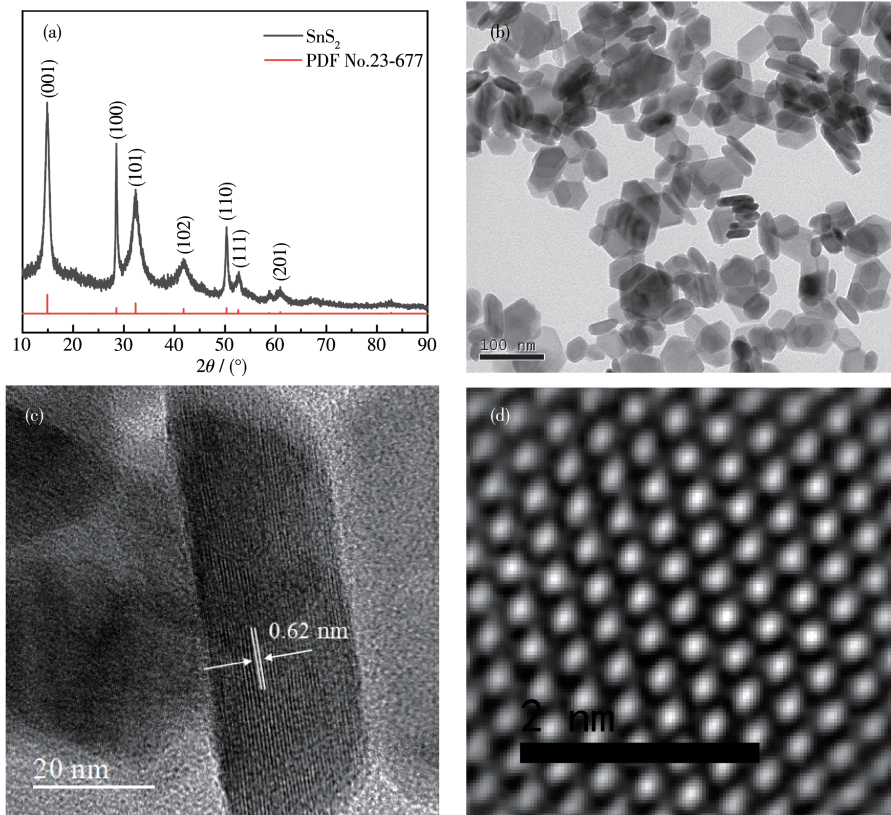
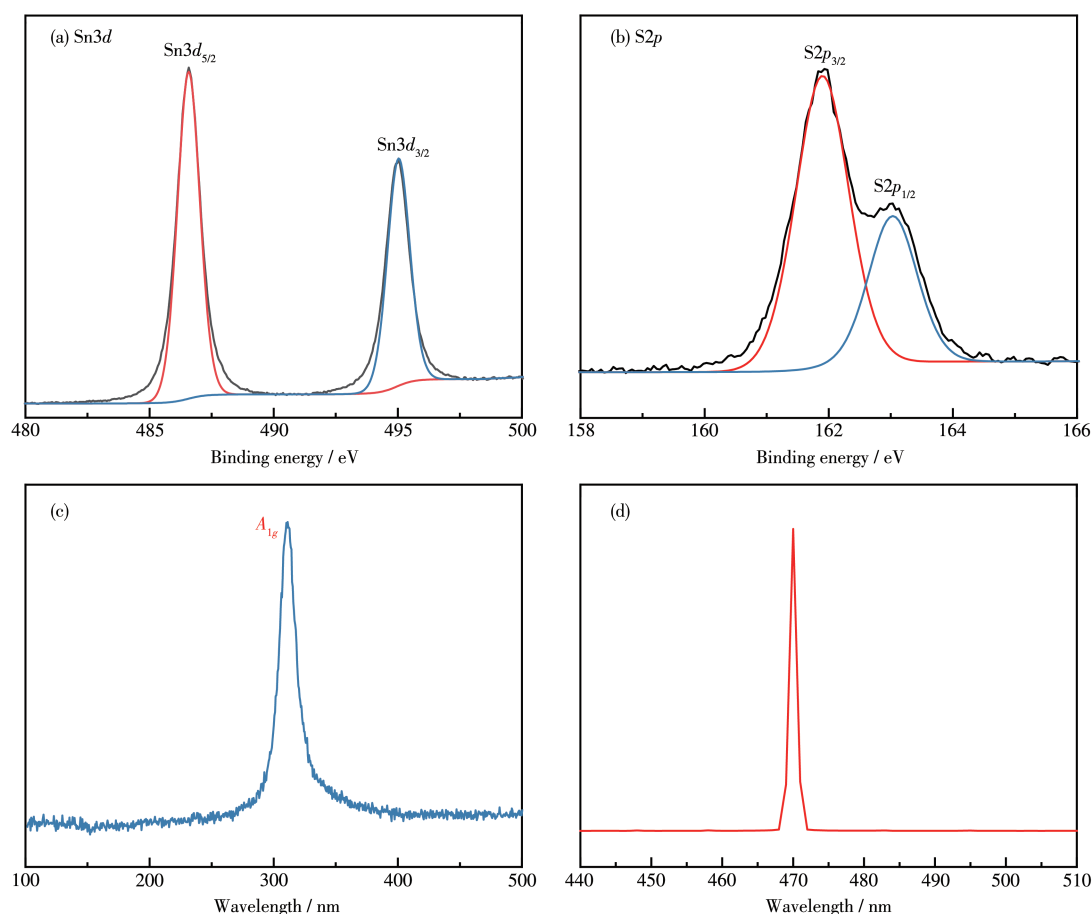


图1 水热法合成SnS₂样品的(a) XRD图、(b) TEM图和(c、d) HRTEM图

Fig.1 (a) XRD pattern, (b) TEM image, (c, d) HRTEM images of SnS₂ by hydrothermal method

图2 SnS₂纳米片的(a、b) XPS价带谱图、(c) 拉曼光谱图和(d) PL光谱图Fig.2 (a, b) XPS spectra, (c) Raman spectrum and (d) PL spectrum of SnS₂ nanosheets

结构是2H相^[29]。

PL光谱图是用来表征材料电子和空穴分离效率高低的有效手段,材料在光的激发下,电子从价带跃迁至导带并留下相应空穴形成电子-空穴对,电子-空穴对在后续复合时会发光,从而形成不同波长光的强度光谱图。图2d为SnS₂的PL光谱图,光源激发波长为235 nm,样品特征峰出现在470 nm左右,对应本征激发产生的电子-空穴对复合时所发的光^[30]。

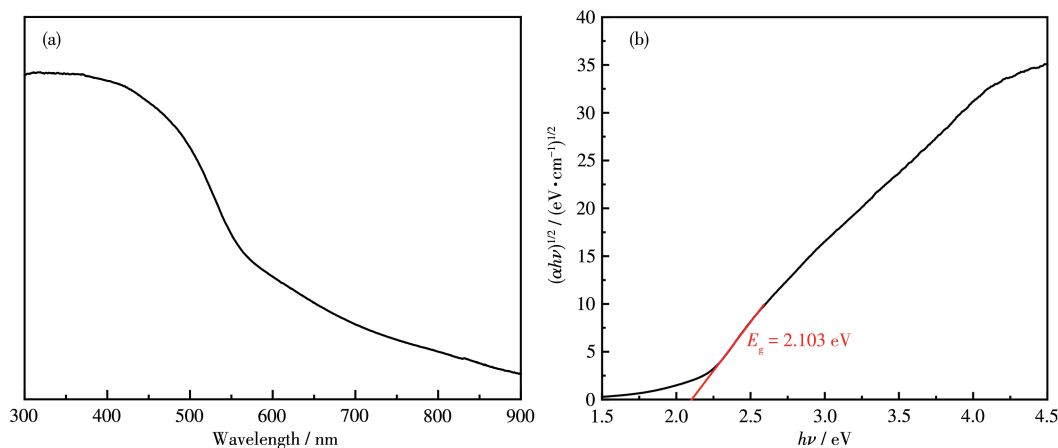
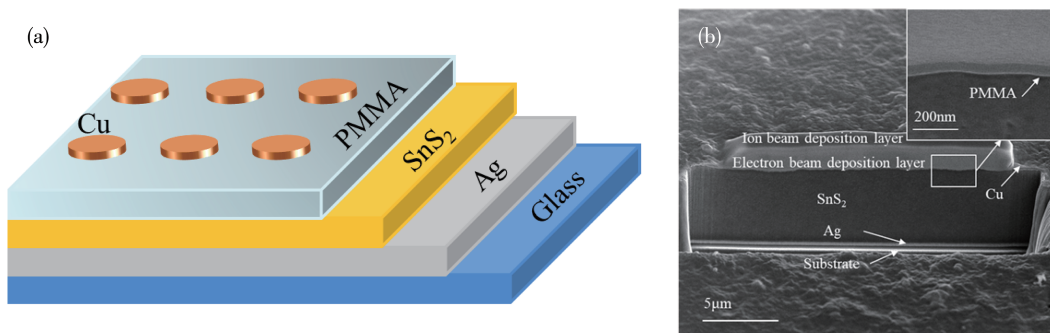
采用UV-Vis DRS谱图表征SnS₂的光学性质。UV-Vis DRS是根据分子中的某些基团吸收了紫外可见辐射光后,发生电子能级跃迁而产生。如图3a所示,SnS₂在250~900 nm范围内均有一定的吸收,且在560 nm出现了一个较短的线性吸收边。造成这种现象的原因是SnS₂的禁带宽度较窄,可见光响应强,扩大了光吸收范围。而半导体的禁带宽度可以通过以下能隙公式计算^[31]:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{n/2}$$

其中 α 、 h 、 ν 、 A 和 E_g 分别是吸收系数、普朗克常数、光频率、比例常数和禁带宽度。此外, n 的值取决于半导体中激子跃迁的类型:直接跃迁, $n=1$;间接跃迁, $n=4$ 。由于SnS₂纳米片是直接过渡半导体,故 $n=1$ ^[32-33]。因此,SnS₂纳米片的禁带宽度可以根据 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 与光子能量 $(h\nu)$ 的相对关系进行计算^[34]。根据吸收谱图作出SnS₂纳米片的 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ -($h\nu$)关系图,如图3b所示。对此曲线最接近直线的一部分进行外推,与横轴交点的横坐标即为SnS₂纳米片的光学禁带宽度,得到其禁带宽度约为2.103 eV,该结果与文献报道的理论值相接近^[35]。

2.2 Cu/PMMA/SnS₂/Ag的阻变性能表征

图4a为Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM的结构示意图。为了进一步了解Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM中阻变层厚度,采用聚焦离子/电子双束镜(FBI)对材料提供沉积保护层,避免污染和损伤器件,同时研究器件的断面结构。图4b为Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM的断面SEM图,插图为局部放大的高倍断面SEM

图3 SnS_2 纳米片的(a) UV-Vis DRS谱图和(b) 能隙计算图Fig.3 (a) UV-Vis DRS spectra and (b) energy band gaps of SnS_2 nanosheets

Inset in (b): corresponding enlarged image

图4 Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM的(a) 结构示意图与(b) 断面SEM图Fig.4 (a) Structural diagram and (b) cross-sectional SEM image of Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM

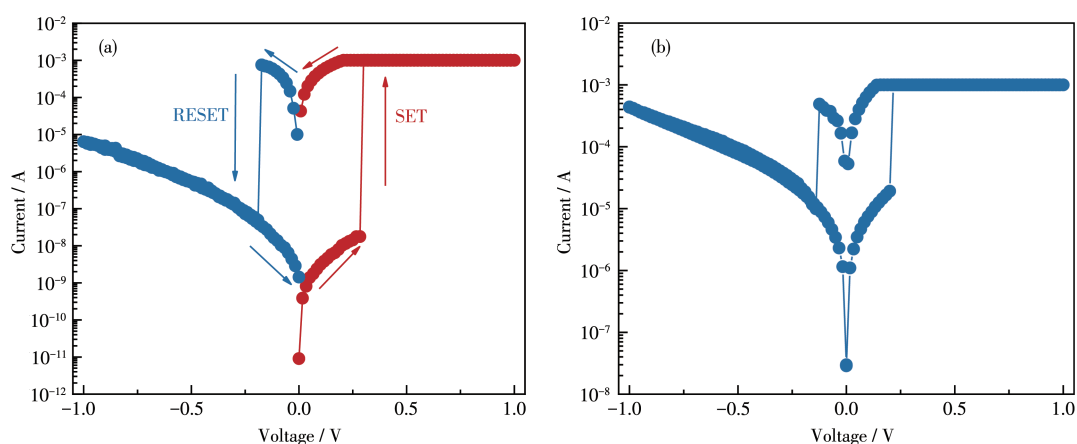
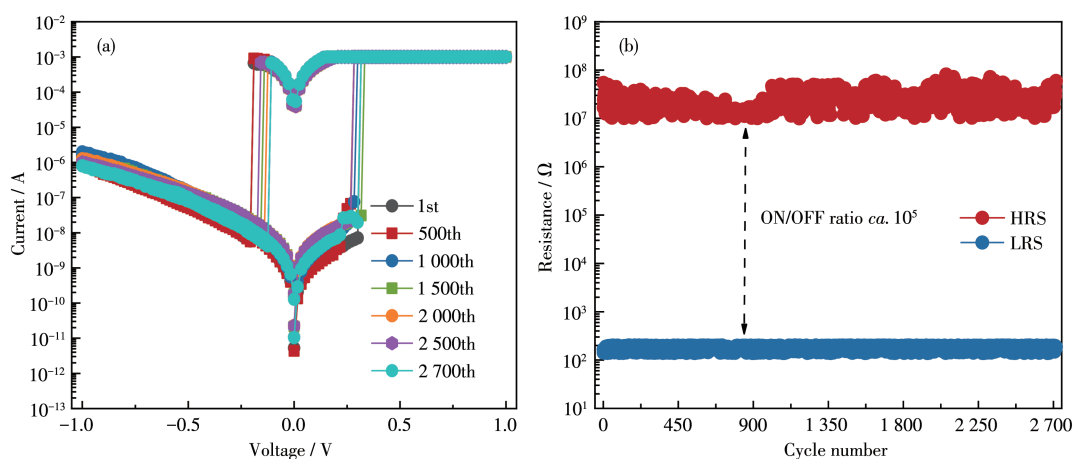
图,图中可以清晰观察到Cu/PMMA/ SnS_2 与PMMA/ SnS_2 /Ag的界面。其中PMMA/ SnS_2 阻变层厚度约5 μm ,这不仅增加了截止状态下的电阻,而且为电荷迁移提供了足够的通道。

图5a为Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM的*I-V*特性曲线图。通过2个探针将偏置电压分别施加到器件的顶部Cu电极与底部Ag电极上,同时Cu电极接地,在-1.0~1.0 V的外加电压扫描范围内,设置 10^{-3} A的限制电流进行伏安特性测试。由图中观察到,器件的初始态为高阻态(high resistance state, HRS),直到施加0.28 V的工作电压后,电流从 1.766×10^{-8} A突然增加到 10^{-3} A,导致器件从HRS向低阻态(low resistance state, LRS)转变,实现SET过程。而在负向电压扫描下,施加-0.19 V的工作电压,电流从 7.54×10^{-4} A突然降低至 4.53×10^{-8} A,器件由LRS转变回到HRS,实现RESET过程,表现出双极性阻变行为。

如图5b所示,对于在同一片玻璃衬底上、同一批工艺制备的不含 SnS_2 薄膜的Cu/PMMA/Ag参考器

件,在-1.0~1.0 V的外加电压扫描下,尽管也表现出一定的双极性阻变行为,但其HRS与LRS的开关比值(ON/OFF ratio)远远低于Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM。由于水热法合成的 SnS_2 纳米片本身尺寸小,制备的 SnS_2 薄膜厚度相对不均匀,从而使顶部Cu电极与底部Ag电极易发生接触。PMMA作为一种光伏活性高分子聚合物材料,制备出的PMMA薄膜一方面填补了 SnS_2 薄膜不平整的表面,使其厚度分布均匀,另一方面,PMMA薄膜与外部环境隔绝形成一层保护膜,防止 SnS_2 薄膜氧化。

图6a显示了Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM分别第1次、第500次、第1 000次、第1 500次、第2 000次、第2 500次和第2 700次循环下的*I-V*曲线,由图可知,器件在2 700个循环中都表现出类似的双极性阻变行为,具有高度重复性,证明该器件具有优良的抗疲劳特性。通常情况下,RRAM需要一个较大电压的初始化操作来诱导器件后续稳定的电阻转变行为,这个操作通常称为电激活过程(forming)。

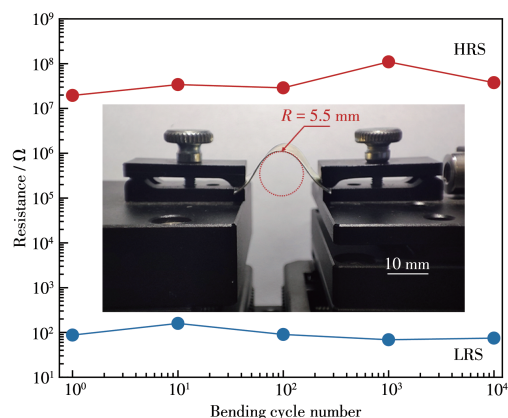
图5 (a) Cu/PMMA/SnS₂/Ag和(b) Cu/PMMA/Ag RRAMs的 *I*-*V*特性曲线图Fig.5 Typical *I*-*V* characteristic curves of (a) Cu/PMMA/SnS₂/Ag and (b) Cu/PMMA/Ag RRAMs图6 Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM的(a) 循环扫描 *I*-*V*曲线与(b) HRS和LRS统计图Fig.6 (a) Cycle scanning *I*-*V* curves and (b) endurance characteristics for HRS and LRS of Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM

但是,由图6a可知,Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM的首个 *I*-*V*曲线与其他曲线基本一致,因此不需要电激活过程。同时,Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM的HRS和LRS数据稳定性如图6b所示。在经过2700次循环测试后,HRS和LRS都显示出极高的稳定性,且开关比高达约10⁵,说明器件具有优异的耐受性。

为了研究SnS₂在柔性电子器件中的应用潜力,我们将SnS₂抽滤在镀有Ag电极的PET(polyethylene terephthalate,聚对苯二甲酸乙二酯)衬底上制备Cu/PMMA/SnS₂/Ag柔性RRAM以研究其阻变性能。如图7所示,插图为Cu/PMMA/SnS₂/Ag柔性RRAM弯曲照片,曲率半径为5.5 mm,在经过10⁴次弯曲后,器件的HRS和LRS基本保持不变,且开关比仍能达到约10⁵,说明器件具有优异的机械耐受性。这对于开发高性能柔性电子存储器件有着重要意义。

为了探究Cu/PMMA/SnS₂/Ag RRAM中电流的传

导机制,将正向阻变曲线的电流和电压取对数,得到如图8所示的双对数曲线。如图8a所示,LRS和

图7 Cu/PMMA/SnS₂/Ag柔性RRAM弯曲循环后的HRS和LRS统计图Fig.7 HRS and LRS cartogram of Cu/PMMA/SnS₂/Ag flexible RRAM after bending cyclic

HRS的 I - V 曲线拟合斜率都约为1,符合欧姆传导^[36]。当对 Ag 电极施加正向偏置电压时,Ag 顶电极中的 Ag 原子得到正电荷被氧化成为 Ag^+ 离子($\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$),此时器件处于 HRS。而当对 Ag 电极继续施加电压时,这些 Ag^+ 离子在电场的作用下通过 SnS_2 阻变层向 Cu 电极迁移。当它们到达 Cu 电极后,又从那里得到负电荷被还原成为 Ag 原子($\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$)。这些 Ag 金属原子经过不断的累积,在 SnS_2 阻变层中形成连通上下电极的导电细丝^[37],此时器件从 HRS 转变为 LRS。当对器件施加反向电压的时候,导电细丝中的 Ag 原子再次被氧化成为 Ag^+ 离子,导电细丝断开,器件因此回到 HRS。上述过程周而复始地通过工作电压引起 Ag 导电细丝的产生和断裂,使器件处于 HRS 和 LRS。

为了证明该传导机制的准确性,对器件上同一点进行循环 I - V 曲线测试,其结果如图 8b 图所示,分别选取第 1 次、第 500 次、第 1 000 次、第 1 500 次、第 2 000 次、第 2 500 次和第 2 700 次循环测试的数值,将其中电流和电压取对数来进行 HRS 和 LRS 的线性拟合。由图可以看出,随着循环次数的递增,器件的阻值会发生轻微的波动,但 HRS 和 LRS 的斜率仍然保持不变。这表明 Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM 中的确发生欧姆传导。

如表 1 所示,与已经报道的同类型二维材料存储器件的阻变性能相比,Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM 既表现出优异的电学性能(低的限制电流、低的工作电压和更高的开关比),又保持了显著的抗疲劳特性。

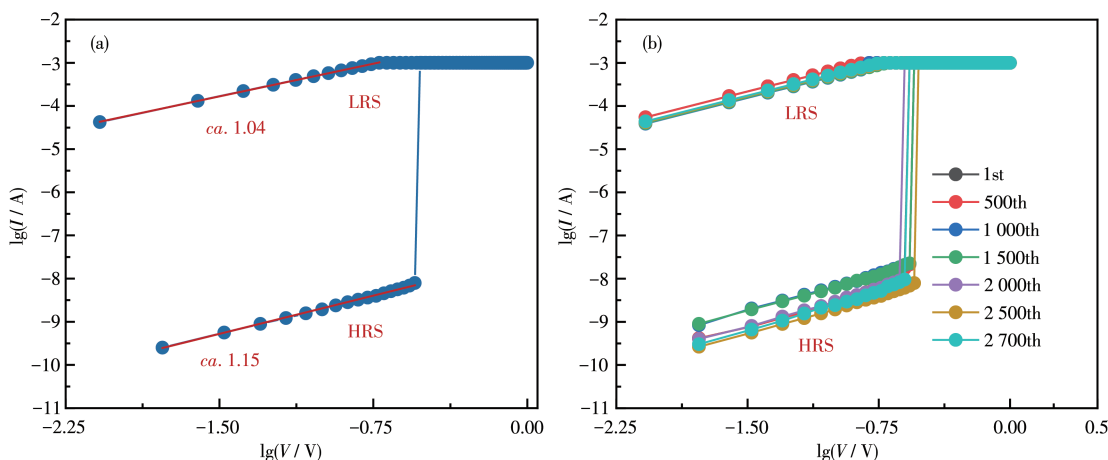


图8 Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM的(a) 双对数 I - V 曲线和(b) 多循环双对数 I - V 曲线

Fig.8 (a) Typical double logarithmic I - V curves and (b) multi-cycle double logarithmic I - V curves of Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM

表1 基于 Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag RRAM 与已报道的其他阻变材料的存储器件性能比较

Table 1 Performance comparison between RRAM based on Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag and other memory devices that have been reported

Sample	Current limiting / A	SET/RESET potential / V	ON/OFF ratio	Cycle number	Ref.
MoSe_2	10^{-2}	1.5	10^2	10^2	[5]
MoS_2	10^{-2}	0.43	10^3	10^2	[20]
PI-GO	10^{-3}	2.65	10^8	10^2	[21]
PMMA- MoS_2	10^{-6}	2.5	10^3	10^5	[22]
$\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{MoS}_2$	—	5	10^4	10^2	[38]
GO-AuNPs	10^{-1}	6	10^8	—	[39]
Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag	10^{-3}	ca. 0.28	ca. 10^5	2.7×10^3	This work

3 结论

采用水热法制备了尺寸大小为 50~100 nm 的超薄 SnS_2 纳米片,其禁带宽度约为 2.103 eV。首次报

道了以 SnS_2 作为阻变层材料的 Cu/PMMA/ SnS_2 /Ag 阻变存储器。该器件表现出优异的非易失性和可重复双极性阻变特性,开态电压约 0.28 V,关态电压约 -0.19 V,开关比约 10^5 , 2.7×10^3 次循环扫描后高低

阻仍具有超高的稳定性。此外, Cu/PMMA/SnS₂/Ag 阻变存储器的阻变性能是由于 Ag 导电细丝的产生和断裂, 使器件处于 HRS 和 LRS; 器件在 HRS 与 LRS 时的阻变机制均符合欧姆传导。这些对于开发高性能柔性电子存储器件有着重要意义。

参考文献:

- [1] Guo T, Elsheikh H, Yu Z, Yu B, Wang D, Kadhimi M S, Chen Y Z, Hou W T, Sun B. Effect of Crystalline State on Conductive Filaments Forming Process in Resistive Switching Memory Devices. *Mater. Today Commun.*, **2019**, **20**:100540-100555
- [2] Sharma Y, Pavunny S P, Fachini E, Scott J F, Katiyar R S. Nonpolar Resistive Memory Switching with all Four Possible Resistive Switching Modes in Amorphous LaHoO₃ Thin Films. *J. Appl. Phys.*, **2015**, **118** (9):4506-4514
- [3] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, Williams R S. The Missing Memristor Found. *Nature*, **2008**, **453**:80-83
- [4] Onofrio N, Guzman D, Strachan A. Atomic Origin of Ultrafast Resistance Switching in Nanoscale Electrometallization Cells. *Nat. Mater.*, **2015**, **14**(4):440-446
- [5] Zhou G D, Sun B, Yao Y Q, Zhang H H, Zhou A K, Alameh K, Ding B F, Song Q L. Investigation of the Behaviour of Electronic Resistive Switching Memory Based on MoSe₂-Doped Ultralong Se Microwires. *Appl. Phys. Lett.*, **2016**, **109**(14):5655-5657
- [6] Ghoneim M T, Zidan M A, Alnassar M Y, Hanna A N, Kosel J, Salama K N, Hussain M M. Flexible Electronics: Thin PZT-Based Ferroelectric Capacitors on Flexible Silicon for Nonvolatile Memory Applications. *Adv. Electron. Mater.*, **2015**, **1**(6):1-6
- [7] Ungureanu M, Zazpe R, Golmar F, Stoliar P, Llopis R, Casanova F, Hueso L E. A Light - Controlled Resistive Switching Memory. *Adv. Mater.*, **2012**, **24**(18):2496-2500
- [8] Mao S S, Zhang X J, Sun B, Li B, Zhu S H, Zheng P P, Zheng L, Xia Y D. Multi - stage Switching Phenomenon in Ultra - Thin Ag Films Embedded into SrCoO₃ Multilayer Films Constructed Resistive Switching Memory Devices. *Funct. Mater. Lett.*, **2018**, **2**:1850-1857
- [9] Lv F Z, Gao C X, Zhang P, Dong C H, Zhang C, Xue D S. Bipolar Resistive Switching Behavior of CaTiO₃ Films Grown by Hydrothermal Epitaxy. *RSC Adv.*, **2015**, **5**(51):40714-40718
- [10] Borghetti J, Snider G S, Kuekes P J, Yang J J, Stewart D R, Williams R S. Memristive Switches Enable Stateful Logic Operations via Material Implication. *Nature*, **2010**, **464**:873-876
- [11] 张佳旗, 吴小峰, 马新育, 袁龙, 黄科科, 冯守华. 脉冲激光沉积制备非晶 La_{0.75}Sr_{0.25}MnO₃ 薄膜用于半透明阻变存储器. *无机化学学报*, **2018**, **34**(4):784-790
ZHANG J Q, WU X F, MA X Y, YUAN L, HUANG K K, FEN S H. Amorphous La_{0.75}Sr_{0.25}MnO₃ Film Prepared by Pulsed Laser Deposition for Translucent Resistive Memory. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2018**, **34** (4):784-790
- [12] 吴小峰, 袁龙, 黄科科, 冯守华. 无机固体材料中的忆阻效应. *无机化学学报*, **2015**, **31**(9):1726-1738
WU X F, YUAN L, HUANG K K, FENG S H. Memristive Effects in Inorganic Solid Materials. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2015**, **31**(9):1726-1738
- [13] Zhao M, Zhu Y D, Wang Q W, Wei M C, Liu X L, Zhang F, Hu C, Zhang T T, Qiu D, Li M Y, Xiong R. Electric Field-Induced Coexistence of Nonvolatile Resistive and Magnetization Switching in Pt/NiO/Nb: SrTiO₃ Heterostructure. *Appl. Phys. Lett.*, **2016**, **109**(13):504-510
- [14] Sangwan V K, Jariwala D, Kim I S, Chen K S, Marks T J, Lauhon L J, Hersam M C. Gate-Tunable Memristive Phenomena Mediated by Grain Boundaries in Single-Layer MoS₂. *Nat. Nanotechnol.*, **2015**, **10** (5):403-406
- [15] Das S, Gulotty R, Sumant A V, Roelofs A. All Two - Dimensional, Flexible, Transparent, and Thinnest Thin Film Transistor. *Nano Lett.*, **2014**, **14**(5):2861-2866
- [16] Pawbake A S, Waykar R G, Late D J, Jadkar S R. Highly Transparent Wafer Scale Synthesis of Crystalline WS₂ Nanoparticle Thin Film for Photodetector and Humidity Sensing Applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2016**, **8**(5):3359-3384
- [17] 邵雅洁, 沈杰, 龚少康, 陈文, 周静. CuInS₂ 量子点阻变效应. *无机化学学报*, **2020**, **36**(11):2093-2099
SHAO Y J, SHEN J, GONG S K, CHEN W, ZHOU J. Resistance Switching Effect of CuInS₂ Quantum Dots. *Chinese J. Inorg. Chem.*, **2020**, **36**(11):2093-2099
- [18] Serag M F, Kaji N, Gaillard C, Okamoto Y, Terasaka K, Jabasini M, Tokeshi M, Mizukami H, Bianco A, Baba Y. Trafficking and Subcellular Localization of Multiwalled Carbon Nanotubes in Plant Cells. *ACS Nano*, **2011**, **5**(1):493-499
- [19] Zhai Y B, Yang X Q, Wang F, Li Z X, Ding G L, Qiu Z F, Wang Y, Zhou Y, Han S T. Infrared-Sensitive Memory Based on Direct-Grown MoS₂-Upconversion-Nanoparticle Heterostructure. *Adv. Mater.*, **2018**, **30**(49):103563
- [20] Sun B, Zhao W X, Liu Y H, Chen P. Resistive Switching Effect of Ag/MoS₂/FTO Device. *Funct. Mater. Lett.*, **2015**, **8**(1):50010-50014
- [21] Choi J Y, Yu H C, Lee J J, Jeon J H, Im J H, Jang J H, Jin S W, Kim K K, Cho S H, Chung C M. Preparation of Polyimide/Graphene Oxide Nanocomposite and Its Application to Nonvolatile Resistive Memory Device. *Polymers*, **2018**, **10**(8):901
- [22] Bhattacharjee S, Sarkar P K, Prajapat M, Roy A. Electrical Reliability, Multilevel Data Storage and Mechanical Stability of MoS₂ - PMMA Nanocomposite - Based Non - Volatile Memory Device. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **2017**, **51**(9):1-8
- [23] Rehman M M, Rehman H M M U, Gul J Z, Kim W Y, Karimov K S, Ahmed N. Decade of 2D Materials Based RRAM Devices: A Review. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **2020**, **173**:236-327
- [24] Geng H J, Su Y J, Hao W, Xu M H, Wei L M, Yang Z, Zhang Y F. Controllable Synthesis and Photoelectric Property of Hexagonal SnS₂ Nanoflakes by Triton X-100 Assisted Hydrothermal Method. *Mater. Lett.*, **2013**, **111**(10):204-207
- [25] Huang Y, Sutter E, Sadowski J T, Cotlet M, Monti O L, Racke D A,

- Neupane M R, Wickramaratne D, Lake R K, Parkinson B A, Sutter P. Tin Disulfide—An Emerging Layered Metal Dichalcogenide Semiconductor: Materials Properties and Device Characteristics. *ACS Nano*, **2014**,**8**(13):10743-10755
- [26] Mu J L, Miao H, Liu E Z, Feng J, Teng F, Zhang D K, Kou Y M, Jin Y P, Fan J, Hu X Y. Enhanced Light Trapping and High Charge Transmission Capacities of Novel Structure for Efficient Photoelectrochemical Water Splitting. *Nanoscale*, **2018**,**10**:11881-11893
- [27] Tu F Z, Xu X, Wang P Z, Si L, Zhou X S, Bao J. A Few-Layer SnS₂/Reduced Graphene Oxide Sandwich Hybrid for Efficient Sodium Storage. *J. Phys. Chem. C*, **2017**,**121**:3261-3293
- [28] Liu J Z, Xia C X, Li H L, Pan A L. High On/Off Ratio Photosensitive Field Effect Transistors Based on Few Layer SnS₂. *Nanotechnology*, **2016**,**27**(34):1-7
- [29] Smith R J, King P J, Lotya M, Wirtz C, Khan U, De S, O'Neill A, Duesberg G S, Grunlan J C, Moriarty G, Chen J, Wang J Z, Minett A I, Nicolosi V, Coleman J N. Large-Scale Exfoliation of Inorganic Layered Compounds in Aqueous Surfactant Solutions. *Adv. Mater.*, **2011**,**23**:3944-3948
- [30] Deshpande N G, Sagade A A, Gudage Y G, Lokhande C D, Sharma R J. Growth and Characterization of Tin Disulfide (SnS₂) Thin Film Deposited by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) Technique. *J. Alloys Compd.*, **2017**,**436**(2):421-426
- [31] Zhang Y C, Zhang F, Yang Z J, Xue H G, Dionysiou D D. Development of a New Efficient Visible-Light-Driven Photocatalyst from SnS₂ and Polyvinyl Chloride. *J. Catal.*, **2016**,**344**:692-700
- [32] Liu G B, Li Z H, Hasan T, Chen X S, Zheng W, Feng W, Jia D C, Zhou Y, Hu P A. Vertically Aligned Two-Dimensional SnS₂ Nanosheets with a Strong Photon Capturing Capability for Efficient Photoelectrochemical Water Splitting. *J. Mater. Chem. A*, **2017**,**5**(5):1989-1995
- [33] Teng W, Wang Y M, Huang H H, Li X Y, Tang Y B. Enhanced Photoelectrochemical Performance of MoS₂ Nanobelts-Loaded TiO₂ Nanotube Arrays by Photo-Assisted Electrodeposition. *Appl. Surf. Sci.*, **2017**,**425**(17):507-517
- [34] Takeda N, Parkinson B A. Adsorption Morphology, Light Absorption, and Sensitization Yields for Squaraine Dyes on SnS₂ Surfaces. *J. Am. Chem. Soc.*, **2003**,**125**(18):5559-5571
- [35] Hu X H, Song G S, Li W Y, Peng Y L, Jiang L, Xue Y F, Liu Q, Chen Z G, Hu J Q. Phase-Controlled Synthesis and Photocatalytic Properties of SnS, SnS₂ and SnS/SnS₂ Heterostructure Nanocrystals. *Mater. Res. Bull.*, **2013**,**48**(6):2325-2332
- [36] Pradhan S K, Xiao B, Mishra S, Killam A, Pradhan A K. Resistive Switching Behavior of Reduced Graphene Oxide Memory Cells for Low Power Nonvolatile Device Application. *Sci. Rep.*, **2016**,**6**:1-9
- [37] Celano U, Goux L, Belmonte A, Opsomer K, Franquet A, Schulze A, Detavernier C, Richard O, Bender H, Jurczak M, Vandervorst W. Three-Dimensional Observation of the Conductive Filament in Nanoscaled Resistive Memory Devices. *Nano Lett.*, **2014**,**14**(5):2401-2406
- [38] Hou X, Yan X, Liu C S, Ding S J, Zhang D W, Zhou P. Operation Mode Switchable Charge-Trap Memory Based on Few-Layer MoS₂. *Semicond. Sci. Technol.*, **2018**,**33**:4001-4013
- [39] Yun D Y, Kim T W. Nonvolatile Memory Devices Based on Au/Graphene Oxide Nanocomposites with Bilateral Multilevel Characteristics. *Carbon*, **2015**,**88**:26-32