

“柔性高清显示用二维半导体材料”

成果登记公示信息

成果名称:	柔性高清显示用二维半导体材料
完成单位:	松山湖材料实验室,中国科学院物理研究所
完成人员:	张广宇,吴克辉,冼乐德,龙根,杨威,杨 蓉,何小月,王硕培,李娜,吴良妹,王琴琴,魏争,汤建,李佳蔚,刘杰英,田金鹏,郭玉拓,李璐,张颂歌,陈雨彤,周兰英,褚衍邦,咎晓洲,赵交交,余画,杜罗军,熊智松,袁亚龙,季怡汝,吴帆帆,袁嘉浩,张兴超,潘子添,董经纬,王雨辰,王泊鑫
研究起止日期:	2020-08-20 至 2023-08-19
成果应用行业:	科学研究和技术服务业
高新技术领域:	新材料
评价单位:	广东省科学技术厅
评价日期:	2024-03-07
成果简介:	一、高质量、晶圆级二维半导体材料的外延生长 ①课题来源与背景:在晶体管尺寸持续微缩的发展趋势下,传统硅基半导体器件达到了物理极限,面临着性能与功耗的瓶颈。高迁移率二维半导体,因其物理极限的单原子层厚度、强的栅控能力、表面原子级平整且无悬挂键,是解决当前瓶颈,构筑亚纳米高性能半导体芯片的一类战略新材料。 ②技术原理及性能指标:通过自主设计搭建的多源化学气相沉积系统,采用氧辅助的化学气相沉积法,调控生长条件成功实现了高质量二维半导体材料的大面积可控层制备。单层二硫化钼器件平均迁移率可达到$\sim 70\text{cm}^2\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$、开关比为$\sim 10^8$,双层器件平均迁移率超过$100\text{cm}^2\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$、开关比达到$10^9$。 ③技术的创造性与先进性:基于对生长机理的深刻认识,在前期氧辅助生长的基础上,针对性地通过优化生长设备、合理增加金属源数量并有效调控两源浓度,实现了二维半导体高定向、大晶粒、层数可控的均匀生长。这一技术有效攻克了前期制备过程中的关键难题,如材料层数难以控制,晶粒尺寸小,晶界密度高、取向随机等问题,最终实现了层数可控的高质量大面积薄膜的制备。 ④技术的成熟程度,适用范围和安全性:目前技术成熟度为7级,适用于4英寸晶圆制备,兼容现有半导体工艺。材料无毒且稳定性高。 ⑤应用情况及存在的问题:主要面向逻辑芯片、柔性电子和光电探测器等领域。主要的问题有界面质量控制困难、器件性能不均匀、成品率低。 二、范德华力或PDMS辅助转移晶圆级二维半导体材料及图形化技术 ① 课题来源与背景:鉴于高质量的半导体材料通常需要在高温条件下合成,而制作柔性TFT器件时,需要将其转移至不耐高温的柔性衬底上。然而,在转移过程中,极易出现薄膜破裂、褶皱等问题。该成果采用范德华力和PDMS辅助转移技术以及针尖划图案的办法有效提高薄膜转移的完整性和均匀性。 ②技术原理及性能指标:探索优化了范德华力以及PDMS辅助转移技术,通过控制转移条件,减少了裂缝和气泡的产生,实现了晶圆级转移与叠层样品构筑,精确控制转角度数,误差控制在~ 0.5度以内;探索了二维半导体材料的图形化加工技术,通过控制针尖的力度和方向实现了二维半导体材料的大面积图形的精细化制作,该直接、快速、洁净的加工过程,减少了紫外曝光过程的胶残留,实现了晶圆级图案的精细制作,误差小于$1\mu\text{m}$。 ③技术的创造性与先进性:突破了现有的技术瓶颈,探索并优化了器件制备

过程中遇到的一些技术难题。例如利用 PDMS 辅助转移、图形化技术等减少了界面杂质、提高了器件性能，为二维半导体的实际应用提供了技术支持。

④技术的成熟程度，适用范围和安全性：目前技术成熟度为 7 级，适用于二硫化钼等过渡金属硫属化合物以及石墨烯等材料的晶圆级转移，可实现微米级精度的图形化。该方法在 20-80℃条件下进行，无有毒化学试剂参与，操作安全性较高。

⑤应用情况及存在的问题：有望用于柔性显示、智能传感和可穿戴设备等领域。在实际应用过程中，需注意避免因机械应力导致的材料破损或污染问题。此外，该技术目前难以适应晶圆级大批量制造，良率提升和成本控制仍是制约其广泛应用的主要瓶颈。

三、基于二维半导体材料的大面积柔性 TFT

①课题来源与背景：在实验上基于二维半导体材料的大面积柔性 TFT 的集成还比较困难，国际上还没有实现四英寸及以上柔性二维半导体器件的制作，除了材料的限制以外，主要是集成制作工艺复杂，大面积二维半导体材料经过转移之后会出现小面积破损、裂缝，造成薄膜空间不连续，无法保证器件高密度、性能均匀以及良率。

②技术原理及性能指标：本成果采用叠层的办法，多次转移，层间相互弥补，提高薄膜覆盖度，保证器件良率，提高器件的迁移率。同时，采用传统微加工工艺，逐层加工器件，确保器件层间兼容且整洁，实现了高密度和高性能，降低了各层厚度，采用了透明栅电极。制备出全透明二维半导体柔性 TFT 器件，实现了介电层厚度减薄至 10nm 以内，平均接触电阻到达 $6K\Omega \cdot \mu m$ ，迁移率突破 $100cm^2V^{-1} \cdot s^{-1}$ 、开关比达到 10^9 、电流密度超过 $100 \mu A/\mu m$ 、亚阈值摆幅小于 100mV/dec。

③技术的创造性与先进性：基于二维半导体材料的柔性 TFT 器件的构筑与传统微加工工艺相兼容，可在柔性衬底上逐层加工器件，器件界面干净且相互耦合，得到了大面积、高密度、均一、高良率的 TFT 器件，为进一步构筑柔性电子器件提供新的研究思路。本成果极具开创性，相关研究能为柔性显示屏的发展和应用提供有力的材料基础及技术，打破了现阶段柔性高清显示的发展瓶颈和市场垄断。

④技术的成熟程度，适用范围和安全性：目前技术成熟度为 6 级，适用于低功耗柔性显示、可穿戴电子及物联网传感等领域。该技术因二维材料均匀性、接触界面优化等挑战，良率和稳定性仍需提升。工艺过程主要涉及低温沉积、光刻等常规半导体技术，安全可控，无高毒性试剂或高温高压风险。

⑤应用情况及存在的问题：未来用于可穿戴电子、物联网等，存在的问题有金属电极与二维半导体界面的肖特基势垒问题未完全解决，影响开关比和功耗。传统半导体工艺可能损伤二维材料，需要开发低温、柔性兼容的集成技术。