

Cu/Gr 复合薄膜的制备与场效应研究

华苗¹ 朱星竹¹ 陈永亮² 陈全芳²

1 西南交通大学物理科学与技术学院, 四川成都, 610031;

2 西南交通大学电气工程学院, 四川成都, 610031;

摘要: 石墨烯是一种二维单层 sp^2 杂化碳原子片, 由于其优异的物理性能, 如高电子导电性、良好的热稳定性和优异的机械强度, 引起了人们的极大关注和研究兴趣。基于石墨烯的器件由于其优越的电气特性, 是未来高速场效应晶体管 (FET) 的有希望的候选者, 本文采用光刻+磁控溅射的方法制备出一系列 Cu/Gr 复合薄膜, 并对其晶体结构、微观形貌、电学性能、场效应进行表征和分析。测试结果表明, Cu 随着溅射时间的增加, 结晶度提高并趋于饱和。电学性能和场效应测试结果表明, 结果表明 Gr/Cu 复合薄膜的电学性能高于纯铜, 开关比 (I_{on}/I_{off}) 高于单层石墨烯, 且阈值电压 (V_{th}), 跨导 (G_m) 和开关比 (I_{on}/I_{off}) 随着薄膜厚度的增加整体呈正相关后趋于稳定。

关键词: 石墨烯; 复合薄膜; lift off 工艺; 场效应

DOI: 10.69979/3041-0673.26.03.010

在新一代电子信息产业中, 场效应晶体管 (FET) 作为集成电路、柔性电子及高频通信器件的核心单元, 其性能提升高度依赖于沟道材料的创新突破^[1]。石墨烯 (Gr) 的发现, 首次在实验上证实了独立存在的二维原子晶体, 其凭借独特的 sp^2 杂化结构展现出卓越的物理化学特性——电子迁移率可达 $200000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ (远超传统硅材料)、机械强度达 130 GPa 、热导率约 $5000\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 且具备优异的化学稳定性, 被视为突破传统硅基器件性能瓶颈、构建高速低功耗 FET 的理想候选材料^[2-3]。然而, 纯石墨烯的零带隙特性导致其场效应开关比 (I_{on}/I_{off}) 极低 (通常 < 10), 难以满足逻辑器件“开-关”状态的清晰区分需求; 为解决纯石墨烯的性能短板, 本文采用“金属层/石墨烯复合”策略——通过引入金属层与石墨烯形成协同作用, 提升器件的开关比与栅控灵敏度。本文研究了 Cu 与石墨烯复合薄膜的制备与电学性能和场效应, 结果表明 Gr/Cu 复合薄膜的电学性能高于纯铜, 开关比高于单层石墨烯, 且 V_{th} , G_m 和 I_{on}/I_{off} 随着薄膜厚度的增加整体呈正相关后趋于稳定。

这些结果为理解金属石墨烯复合机制与场效应相关研究提供了新的实验数据。

1 实验

1.1 实验仪器与实验原料

磁控溅射仪, 沈阳科仪; 紫外线光刻机, 中科院光

电技术研究所; Empyrean X 射线衍射仪, 马尔文帕纳科公司; 场发射扫描电子显微镜 JSM 7800F Prime, 日本电子公司; 四探针台, 成都测芯科技有限公司; 6221/2182A, 2400, KEITHLEY

Si 基底的单层石墨烯, 六碳科技; Cu 靶材, 奥纳靶材。

1.2 实验方法

采用 lift off 工艺和磁控溅射分别在石墨烯上和硅基底上溅射金属 Cu 薄膜, 前者称之为实验组样品 (Cu/Gr 样品), 后者为对照组样品 (Cu/Si 样品)。首先将实验组样品与对照组样品分别进行预处理后旋涂光刻胶, 并经过前烘-曝光-中烘-显影的光刻过程, 得到 lift-off 基片, 将实验组与对照组基片一起放入磁控溅射仪中溅射系列时间梯度的金属层, 得到一系列的 Cu/Gr 与 Cu/Si 复合薄膜, 最后经过剥离与清洗, 得到所需要的实验组和对照组样品。

在室温下使用带有 Cu 靶 $K\alpha 1$ 辐射的 Empyrean 型 X 射线衍射仪对样品的结构进行测试, 在 $15^\circ\sim 60^\circ$ 的角度范围内收集数据, 使用配有高性能 X 射线能谱仪的场发射扫描电子显微镜表征了晶体的形貌与组分。电学性能与场效应测试在 6221/2182A, 吉时利 2400 上进行。

2 结果与讨论

2.1 图案设计与

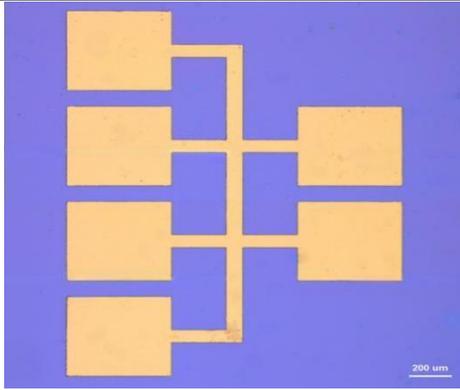


图1 图案设计

样品采取Hall bar结构，如图1所示，总共六个电极，每个相邻电极之间的沟道间距相等，线宽分别为100um和80um。得出的样品通过金相显微镜进行观测，可以观察到图案边缘清晰完整，金属层覆盖完全。

2.2 XRD 衍射分析

图2分别为在硅片上溅射铜和在石墨烯上溅射铜，功率200W，时间45s到300s的xrd表征，可以观察到铜的(111)衍射峰，并随着溅射时间的增加，这些衍射峰的强度增加，这表明铜的结晶度提高，而在大于150s的溅射时间后，铜的结晶度无明显变化。

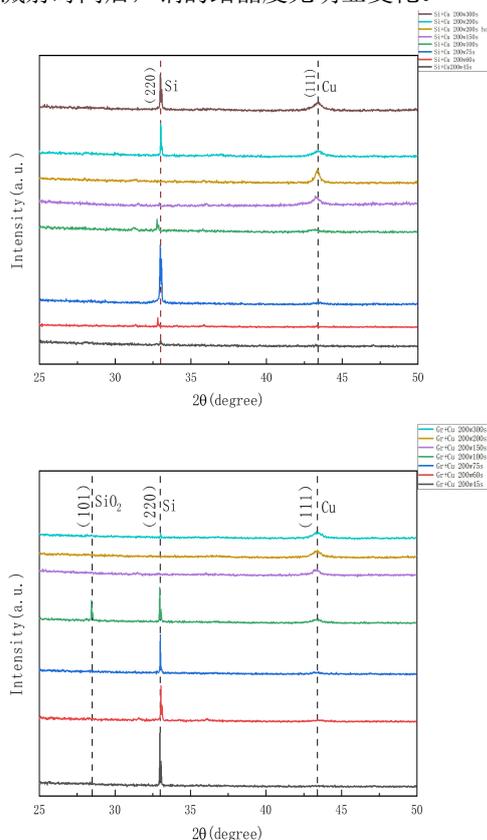


图2 Cu/Si 样品（上）和 Cu/Gr 复合薄膜样品（下）的 X 射线衍射图

2.3 微观形貌分析

我们对样品进行了SEM表征以分析样品表面的金属层生长情况，如图3所示。图3分别为Cu/Gr复合薄膜从45s到100s表面的SEM形貌图以及溅射时间与薄膜厚度的关系。可以观察到，在溅射时间<60s时，表面金属未成膜，晶粒尺寸较小，成岛状分布，随着时间的增加，晶粒尺寸变大，岛状分布的区域没有发生改变，这是由于Cu生长模式遵循“形核→岛状合并→连续膜→柱状晶生长”的演化过程，铜原子沉积到单层石墨烯表面时，因铜与石墨烯的相互作用以弱范德华力为主（无强化化学键），铜原子更倾向于“团聚成岛”而非均匀铺展。在溅射时间>60s时，铜岛持续合并形成连续膜，表面出现柱状晶裂纹，随着溅射时间继续延长，柱状晶会持续纵向生长和横向粗化：柱状晶尺寸随厚度增加而增大，并且溅射时间与薄膜厚度呈正相关。

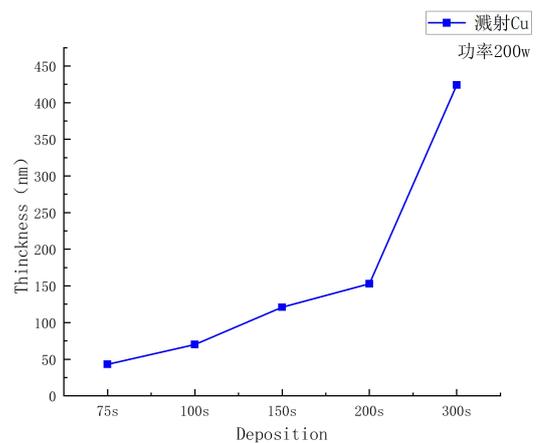
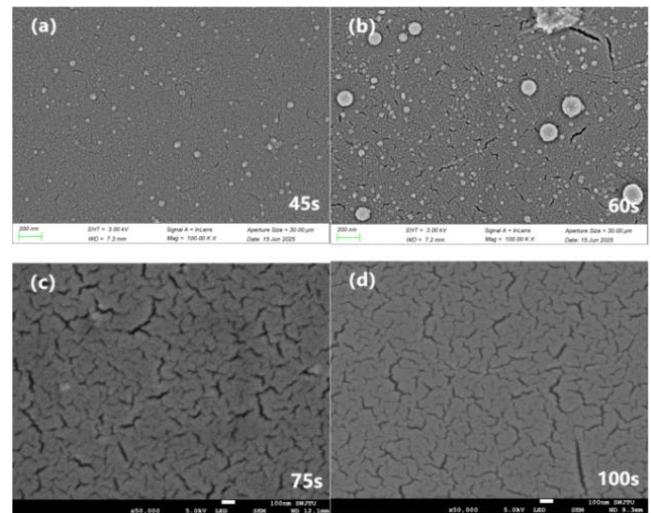


图3 不同溅射时间薄膜样品的形貌（a-d）（45s-100s）（上）和溅射时间与薄膜厚度的关系（下）

2.4 电学性能与场效应分析

为了分析石墨烯的加入对薄膜电阻率的影响，分别对实验组样品和对照组样品通过四探针法进行电阻率测试。得到的数据如图4所示。通过分析数据可以得出，对于两种样品，电阻率均随铜层厚度的增加先急剧降低，后趋于稳定。当铜层厚度很小时（小于50nm），电阻率极高，这是由于溅射初期Cu原子团聚成孤立纳米岛，膜层不完整；即使形成连续膜，晶粒尺寸极小（纳米级），晶界密度高，散射概率高，导致电阻显著增大。当铜层厚度足够大时（超过100nm后），电阻率趋于稳定，这是由于溅射后期的“成熟柱状晶膜”：Cu膜完全连续，柱状晶纵向延伸、横向粗化（晶粒尺寸增大），电阻率趋近于块体铜的本征电阻率。对比两组数据可以分析出石墨烯对铜层电阻率的影响—对比Cu/Si样品和Cu/Gr样品：在相同厚度下，含石墨烯的铜层电阻率显著更低。这表明石墨烯的引入能够改善复合薄膜的电学性能，降低其电阻率。这是由于石墨烯的高导电性与二维电子气特性，可在Cu-Gr界面形成高效电子传输通道，进一步降低电阻率。接着对不同厚度的Cu/Gr复合薄膜进行场效应测试，得到背栅电压与源漏电流的关系，得到的数据如图5所示。可以观察到，当V_g正向增大时，IDS显著升高，说明栅极正偏压注入电子，电子为主要载流子，Cu与石墨烯的复合为N型掺杂。这是由于Cu层与石墨烯接触时，Cu相较于石墨烯功函数低，故Cu向石墨烯注入电子，形成N型掺杂。

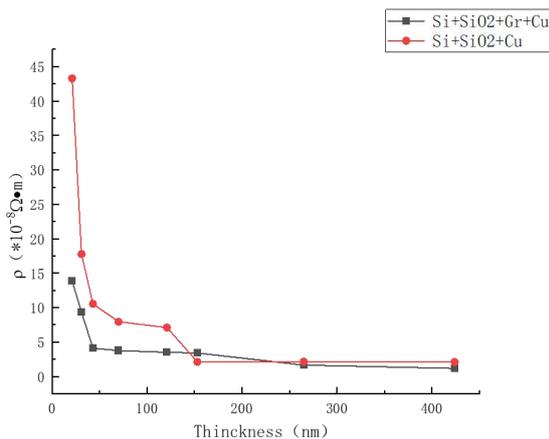


图4 电阻率与薄膜厚度的关系

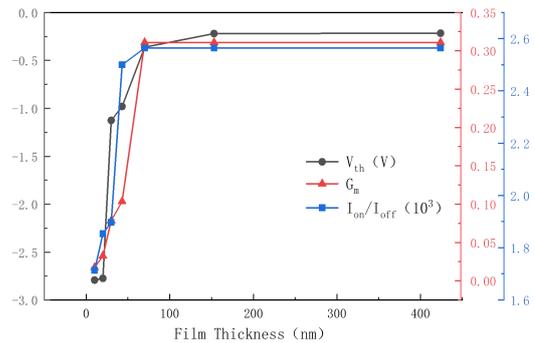
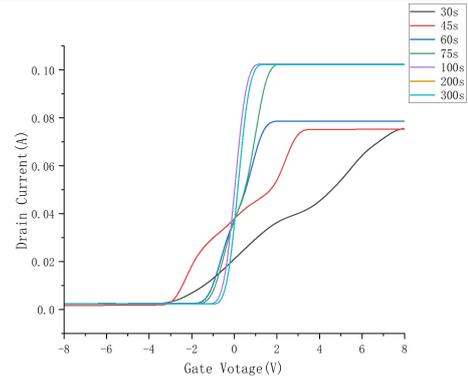


图5 FET 关键参数与薄膜厚度的关系

FET 的关键参数直接决定器件的“驱动难度、栅控灵敏度、开关能力”，且每个参数的变化均与“Cu层厚度对应的微观结构”强关联（岛状膜→连续膜→柱状晶→裂纹增多）。

首先分析阈值电压（V_{th}）与Cu层厚度的关系。Cu层厚度<50nm时，V_{th}绝对值大（>2V），由于此时膜层为岛状膜，载流子浓度低，需更高栅压才能“积累足够载流子开启沟道”；Cu层厚度在50nm-100nm时，V_{th}绝对值快速减小至稳定（0.5~1V），这是由于此时Cu层为连续膜和柱状晶，Cu结晶度高，载流子浓度显著提升，少量栅压即可满足载流子积累需求；Cu层厚度>100nm时，V_{th}绝对值基本稳定，V_{th}无明显变化。

接下来研究跨导（G_m）与Cu层厚度的关系。Cu层厚度<50nm时，G_m极低（<0.05mS/mm），这是由于此时为岛状膜，载流子迁移率低栅压调控电流的“灵敏度”低，G_m自然偏低；Cu层厚度在50nm-100nm时，G_m急剧上升至峰值（0.1-0.3mS/mm），这是由于连续膜+柱状晶的影响，载流子迁移率显著提升栅压对电流的“调控效率”高；G_m达峰值；Cu层厚度>100nm时，G_m有微弱的下降并趋于稳定（0.3mS/mm），此时Cu层已经形成成熟柱状晶+裂纹，迁移率略有降低，G_m随之

下降。

最后分析开关比 (I_{on}/I_{off}) 与 Cu 层厚度的关系。Cu 层厚度 $< 50\text{nm}$ 时, 开关比增长的幅度较小, 这是由于溅射初期形成不连续岛状膜, Cu 原子团聚成孤立纳米岛, 膜层完整性差, 栅压无法有效“关断”电流, “开-关”比值小; Cu 层厚度在 $50\text{nm}-100\text{nm}$ 时, 开关比急剧上升至峰值 (2.5×10^3), 此时膜层处于连续膜+柱状晶启动阶段, 膜连续性提升, 漏电流被抑制, 栅压可有效调控沟道载流子浓度, “开-关”差异最大化; Cu 层厚度 $> 100\text{nm}$ 时, 开关比趋于稳定, 此时 Cu 层达到一定的厚度, 结晶度饱和, 载流子迁移率恒定, I_{on} 维持稳定。

3 结论

采用光刻+磁控溅射的方法制备了一系列 Cu/Gr 与 Cu/Si 样品, 分析 XRD 数据表明在功率 200w , 溅射时间 $> 150\text{s}$ 时, Cu 的衍射峰强度在提高, 这表明 Cu 的结晶度在提高并趋于饱和。电阻率测量结果表明, 石墨烯的引入改善了复合薄膜的电学性能, 场效应测量结果表明, Cu 与石墨烯形成 N 型掺杂, V_{th} , G_m 和 I_{on}/I_{off} 随着薄膜厚度的增加整体呈正相关后趋于稳定。

参考文献

- [1] Huang, X., Yin, Z., Wu, S., Qi, X., He, Q., Zhang, Q., ... Zhang, H. (2011). Graphene - Based Materials: Synthesis, Characterization, Properties, and Applications. *Small*, 7(14), 1876 - 1902. <https://doi.org/10.1002/sml.201002009>
- [2] J. S. Moon et al., "Top-Gated Epitaxial Graphene FETs on Si-Face SiC Wafers With a Peak Transconductance of 600 mS/mm ," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 31, no. 4, pp. 260-262, April 2010, doi: 10.1109/LED.2010.2040132.
- [3] J., T., C., M., Bolten, J., Baus, M., Ramsteiner, M., & Kurz, H. (2007). Graphene field-effect devices. *The European Physical Journal Special Topics*, 148(1), 19 - 26. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2007-00222-8>

作者简介: 华苗 (2001-), 女, 硕士研究生, 西南交通大学, 主要从事半导体薄膜研究。

通讯作者: 华苗