

石墨烯晶体管优化制备工艺在单片集成驱动氮化镓微型发光二极管中的应用

苑营阔 郭伟玲 杜在发 钱峰松 柳鸣 王乐 徐晨 严群 孙捷

Applications of graphene transistor optimized fabrication process in monolithic integrated driving gallium nitride micro-light-emitting diode

Yuan Ying-Kuo Guo Wei-Ling Du Zai-Fa Qian Feng-Song Liu Ming Wang Le Xu Chen Yan Qun Sun Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 197801 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210122

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210122>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有石墨烯/铜铟氧化物复合透明电极的GaN发光二极管

GaN-based light emitting diode with graphene/indium antimony oxide composite transparent electrode

物理学报. 2019, 68(24): 247303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190983>

表面预处理对石墨烯上范德瓦耳斯外延生长Ga_N材料的影响

Effect of surface pretreatment on GaN van der Waals epitaxy growth on graphene

物理学报. 2017, 66(24): 248101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.248101>

微型曲面发光二极管阵列照度一致性研究

Study on uniform irradiance of micro curved-light-emitting diode array

物理学报. 2018, 67(7): 070701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172596>

GaN基微缩化发光二极管尺寸效应和阵列显示

GaN based micro-light-emitting diode size effect and array display

物理学报. 2020, 69(17): 177301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200305>

基于离子注入隔离的微缩化发光二极管阵列性能

Ion implantation isolation based micro-light-emitting diode device array properties

物理学报. 2020, 69(2): 027802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191418>

氮化镓在不同中子辐照环境下的位移损伤模拟研究

Simulated research on displacement damage of gallium nitride radiated by different neutron sources

物理学报. 2020, 69(19): 192401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200064>

石墨烯晶体管优化制备工艺在单片集成驱动氮化镓微型发光二极管中的应用*

苑菅阔¹⁾ 郭伟玲^{1)†} 杜在发¹⁾ 钱峰松¹⁾ 柳鸣¹⁾
王乐¹⁾ 徐晨¹⁾ 严群²⁾ 孙捷^{2)3)‡}

1) (北京工业大学微电子学院, 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

2) (福州大学平板显示技术国家地方联合工程实验室, 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福州 350100)

3) (瑞典查尔摩斯理工大学, 量子器件物理实验室, 哥德堡 41296)

(2021 年 1 月 19 日收到; 2021 年 5 月 24 日收到修改稿)

在显示领域, 微型发光二极管 (micro-LED) 潜力巨大, 有望引领下一代新型显示技术的发展方向, 其显示性能在很多方面优于现有的液晶、有机发光二极管 (OLED), 但巨量的 micro-LED 像素点与驱动电路不在同一晶圆上制备, 面临巨量转移的技术瓶颈. 本文将新兴的石墨烯场效应晶体管作为驱动元件与氮化镓 (GaN) micro-LED 进行单片集成, 因为二者直接制备于同一衬底上, 所以从根源上规避了巨量转移的技术难题. 此外, 传统光刻工艺中紫外光刻胶直接接触石墨烯, 会引入严重掺杂导致场效应晶体管性能较差, 进而影响集成器件性能. 本文提出了一种利用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 薄膜作为保护层, 直接旋涂紫外光刻胶进行垫层光刻的全新工艺方法, 优化了石墨烯场效应晶体管制备工艺. 首先在分立的石墨烯场效应晶体管中进行验证, 相比于没有进行 PMMA 薄膜保护的器件, 采用新工艺制备的石墨烯器件狄拉克点的栅极电压 (V_g) 距零点的偏差降低了 22 V, 载流子迁移率提升了 32%. 此外, 将新工艺应用到集成器件制备后, 发现集成器件性能得到了大幅提升. 利用此新技术, 由于有 PMMA 的保护, 紫外光刻胶不再与敏感的石墨烯沟道直接接触. 掺杂效应和随之而来的器件性能下降被有效扼制. 因为此技术简便而廉价, 所以也可应用到石墨烯之外的其他二维材料中, 例如 MoS_2 和 h-BN , 有望对本领域的器件工程师产生一定的参考价值.

关键词: 石墨烯, 氮化镓, 微型发光二极管, 聚甲基丙烯酸甲酯

PACS: 78.55.Cr, 75.75.-c, 85.35.-p, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.70.20210122

1 引言

随着显示技术的不断发展, 高度微型化和集成化成为显示领域的两大重要的发展方向, 微型发光二极管 (micro-LED) 显示从功耗、分辨率、对比度、寿命等方向超过了目前主流的液晶 (LCD)、有

机发光二极管 (OLED) 显示, 最有潜力成为下一代显示技术, 应用前景十分广阔^[1,2]. Micro-LED 通常指单位像素面积小于或等于 $2.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 的微型发光二极管. 目前, micro-LED 凭借其优异的性能, 成为了众多科研院所以及公司厂商的研究热点. 然而, 它面临的“巨量转移”难题, 放緩了 micro-LED 显示的商业化进程. 例如, 将大量的 micro-

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2018YFA0209000) 和中国福建光电信息科学与技术创新实验室项目 (批准号: 2021ZZ122) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jie.sun@fzu.edu.cn

LED 像素点转移至在另一硅基晶圆上制备的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 驱动电路上, 现阶段的巨量转移技术主要依赖精准抓取, 难以满足其对良率 (大于 99.9999%) 和精度 ($\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以内) 的要求, 存在技术瓶颈. 鉴于巨量转移技术短时间内难以实现质的突破, 近年来, 一些研究人员选择将驱动电路和 micro-LED 单片集成的技术路线, 即将驱动元件和 micro-LED 在同一衬底上制备, 可以有效规避巨量转移这一技术难题, 加速 micro-LED 显示的商业化应用. 在驱动电路和 GaN micro-LED 单片集成的实现方式上, 目前存在多条技术路线, Liu 等^[3] 在蓝宝石基底上使用金属有机化合物气相沉积 (MOCVD) 生长 GaN 高迁移率晶体管 (HEMT), 与蓝光 GaN LED 的外延结构进行单片集成; Lee 等^[4] 在 GaN LED 旁边采用干法刻蚀制备金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET), 串联在一起进行单片集成; 我们课题组^[5] 首次提出将石墨烯场效应晶体管与 GaN micro-LED 单片集成, 开辟了二维材料晶体管新的应用方向. 但是, 在上述技术路线中, 直接生长受限于两种器件的生长温度不兼容, 并且存在晶格失配问题; 刻蚀法由于没有刻蚀停止层, 对刻蚀深度难以把握而且会引入等离子体损伤; 石墨烯场效应晶体管作为驱动的集成 micro-LED 正处于萌芽阶段, 受限于石墨烯晶体管的性能, 导致其对 GaN micro-LED 的调控作用较差, 还需要通过优化晶体管制备工艺来提升集成器件性能.

石墨烯是一种具有原子层厚度的二维晶体材料, 天然地具有超薄、透明、柔性、高迁移率等优点, 非常符合微电子学的发展趋势^[6,7]. 但是在石墨烯场效应晶体管工艺流程中, 由于石墨烯沟道位于表面, 其电学性能易受环境影响而大大降低, 这延缓了二维材料器件走向实际应用的进程. 除了空气中的水、氧等分子导致的掺杂 (多为 p 型掺杂), 标准半导体紫外光刻工艺中使用的紫外光刻胶, 其残留物也会对二维材料产生掺杂. 这可能是由于在紫外光刻法图形化石墨烯过程中, 在空气中旋涂的紫外光刻胶会捕获周围环境中大量水和氧气分子, 它们遗留在二维材料表面的光刻胶残留物中, 并且水分子还可大量存在于亲水衬底表面 (氧化硅), 这些都会导致严重的非故意掺杂, 增加非本征散射, 降低石墨烯载流子迁移率, 进而影响器件电学性能^[8]. 虽然可以通过退火来降低掺杂^[9], 但是效果不彻底.

为避免二维材料直接接触紫外光刻胶, 需要从根本上改进场效应晶体管的制备工艺. Shao 等^[10] 用原子层沉积 (ALD) 生长薄层氧化硅作为保护层, 避免二者直接接触. Zhang 等^[11] 用硅材料做成的掩模版进行图形化金属蒸发, 规避电极光刻这一步骤, 从而避免二维材料直接接触紫外光刻胶. 但是这些方法都存在的问题, 由于二维材料表面很少有悬挂键, ALD 在其表面成核生长极为困难; 用硅作接触掩膜也使二维材料损伤的可能性大大增加. 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 薄膜对二维材料的掺杂作用相对于紫外光刻胶小得多, 且其易溶于有机溶剂, 表面残留较少, 经常被用作机械转移石墨烯薄膜的支撑层材料^[12,13]. 因此很多实验室以 PMMA 为光刻胶, 用电子束曝光将石墨烯图形化, 从而获得较高的器件性能^[14,15]. 但是此法虽可降低掺杂, 却成本高、技术复杂, 不适合批量化生产.

本文提出了一种将 PMMA 薄膜用作紫外光刻垫层保护沟道石墨烯输运层的新工艺, 对石墨烯场效应晶体管的工艺流程进行本质上的优化并将其应用到与 GaN micro-LED 单片集成器件中. 之所以选用 PMMA 作为垫层, 是出于如下几个考虑: 1) 它是已知极少的对二维材料损伤和掺杂较小的聚合物材料之一; 2) 它分子量大、机械强度大, 可以用来转移图形化金属电极; 3) 它的薄膜可以方便地旋涂制备; 4) 它不会被大多数紫外光刻胶的溶剂和显影液溶解; 5) 它可以被氧等离子体方便地与二维材料一起刻蚀干净, 将二维材料图形化; 6) 它可以被丙酮等有机溶剂连同紫外光刻胶一起去除. 新工艺在分立的石墨烯场效应晶体管中室温下实现最大载流子迁移率 $1417 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 跨导 0.699 mS/mm , 相比于传统工艺直接接触紫外光胶器件载流子迁移率提升了 32%, 狄拉克点的 V_g 距零点的偏差降低了 22 V. 此外, 将新工艺应用到集成器件的制备工艺中, 集成器件中的石墨烯场效应晶体管跨导为 0.1042 mS/mm , 迁移率为 $1087 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. 新工艺制备的集成器件与传统工艺制备的集成器件相比, 其石墨烯场效应晶体管跨导显著提升 (旧工艺仅为 0.0449 mS/mm), 进而导致了石墨烯场效应晶体管对 micro-LED 的电流调控能力大幅增强. 此工艺可以推广到其他二维材料 (如硫化钼^[16]、氮化硼^[17]、黑磷^[18]) 中, 用于制备二维材料晶体管并应用到光电探测器等领域. 本文采用新工艺制备的 micro-LED 与石墨烯场效应晶

体管单片集成器件巧妙规避了巨量转移, 验证了新工艺在实际器件应用中的可行性.

2 使用新工艺制备石墨烯场效应晶体管的工艺流程

本文提出的制备石墨烯背栅场效应晶体管的新工艺中, 使用 PMMA 薄膜保护石墨烯场效应晶体管沟道输运层, 避免它直接接触紫外光刻胶而引入严重掺杂和沾污, 流程如图 1 所示, (图 1(i) 为器件的实物图). 首先用硫酸双氧水混合液 (2:1) 清洗硅片, 再用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 在 300 °C 下生长 800 nm 厚的 SiO_2 , 然后光刻并溅射 50 nm 厚的金, 剥离形成场效应晶体管的源漏电极. 样品旋涂 PMMA 并烘干后, 放入氢氟酸腐蚀液 ($\text{HF}:\text{NH}_3\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 3 \text{ ml}:6 \text{ g}:10 \text{ ml}$) 中钻蚀氧化硅牺牲层, 使带有金电极的 PMMA 薄膜漂浮在液体表面, 再将其转移到去离子水中, 清洗 5 遍, 重复 3, 4 次, 然后转移到事先准备好的目标衬底上 (从上到下依次为石墨烯/100 nm SiO_2 /重掺低阻硅) 并烘干. 再在 PMMA 薄膜上直接旋涂紫外光刻胶 AZ5214, 光刻图形化, 用其做掩膜, 保护下面的 PMMA 薄膜和石墨烯, 而将暴露出来的 PMMA/石墨烯用氧等离子体刻蚀干净, 最后放入丙酮溶液中静置 20 min, 重复两次, 彻底去除

PMMA 和其上的紫外光刻胶, 再在异丙醇中浸泡 5 min, 取出待表面残留的液体自然挥发干净后进行后续测试. 在对照组的实验中, 用 PMMA 薄膜辅助转移金属电极后, 将其用丙酮去除干净, 直接进行后续的紫外光刻, 石墨烯沟道无保护层而直接接触紫外光刻胶, 其他步骤则不变.

使用 Horiba France Sas 公司的 LABRAM HR EVO 拉曼光谱仪, 先对已经转移到目标衬底上的商用单层石墨烯 (系 CVD 生长在铜箔上) 进行表征, 然后对优化工艺制备的沟道石墨烯和对比组的沟道石墨烯分别进行表征. 最后, 用 Keysight 公司生产的综合分析仪 B5100A 测试石墨烯场效应晶体管的电学特性, 包括转移和输出特性等.

3 分立石墨烯晶体管的实验结果与讨论

对实验中的石墨烯用拉曼光谱仪进行表征, 拉曼光谱如图 2 所示. 黑色曲线为转移到目标衬底 SiO_2/Si 上、未做器件工艺的石墨烯的拉曼光谱, 可以发现其特征峰中位于 2700 cm^{-1} 左右的 2D 和 1580 cm^{-1} 附近的 G 峰的峰值强度比 I_{2D}/I_G 约为 1.6, 且 2D 峰的半高宽 (FWHM) 为 35 cm^{-1} , 表明石墨烯的层数为单层^[19], 且位于 1350 cm^{-1} 左右的缺陷峰 D 峰几乎没有, 表明该石墨烯结构缺陷

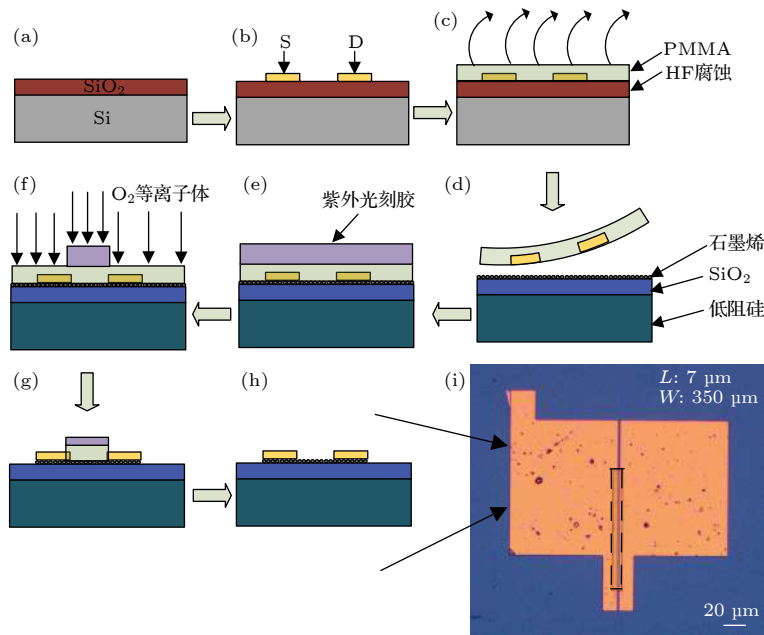


图 1 基于 PMMA 作为载体转移图形化电极并进行石墨烯垫层光刻的新工艺的石墨烯晶体管制备流程图

Fig. 1. Fabricated process of graphene transistor based on PMMA as the carrier to transfer patterned electrode and followed by graphene photolithography with PMMA underlayer.

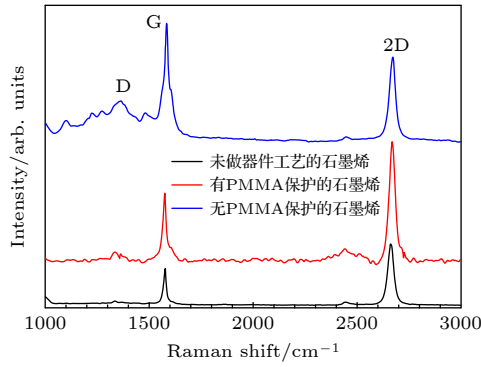


图2 未做器件工艺的石墨烯(黑色曲线)、有PMMA保护的石墨烯沟道(红色曲线)、无PMMA保护的石墨烯沟道的拉曼光谱(蓝色曲线)

Fig. 2. Raman spectra of the graphene that does not undergo any device processing (black curve), graphene channel with PMMA protection (red curve), and graphene channel without PMMA protection (blue curve).

较少. 红色曲线为优化工艺后有PMMA保护的沟道石墨烯拉曼光谱, 和黑色曲线对比, 发现二者较为接近, I_{2D}/I_G 约为 1.6, D 峰强度仍然很低, 说明采用新工艺后, 引入的缺陷和有机物残留的确较少. 蓝色曲线为对比实验中, 直接接触光刻胶的石墨烯拉曼光谱, 相比于有PMMA垫层保护的器件, 对照组的石墨烯D峰显著增高, 已达到G峰高度的37%. 虽然都为单层石墨烯, 但是直接接触紫外光刻胶后 I_{2D}/I_G 比值下降到 0.72, 表明紫外光刻胶的有机物残留引入的空穴掺杂, 大大降低了石墨烯的质量, 并且在石墨烯的拉曼光谱中体现出来^[8,19]. 这种变化趋势, 在器件上的石墨烯的拉曼成像中表现得更明显, 有更直观的反映(如图3所示).

石墨烯的本征费米能级位于导带和价带中间,

通过外加栅电压, 形成垂直于石墨烯平面方向上的电场, 当栅极电压为正时, 费米能级移动到导带, 此时多数载流子为电子, 电压升高电子浓度增大, 电阻降低; 当栅极电压为负时, 费米能级移动到价带, 此时多数载流子为空穴, 电压升高空穴浓度增大, 电阻也降低. 在石墨烯器件的实际制备过程中, 石墨烯接触水、氧气分子以及光刻胶引起电荷转移, 导致其费米能级位于价带呈现 p 型掺杂^[6], 但是上面分析的费米能级随栅压的变化趋势仍然有效, 可以通过调控栅压而调节沟道电流大小. 对新工艺制备的石墨烯场效应晶体管的电学特性进行测试, 转移特性曲线如图4(a)所示, 红色曲线为去胶前测量所得, 栅压在-40—40 V 范围内并没有出现狄拉克点(在没有掺杂或者掺杂较少的石墨烯中狄拉克点应出现在 $V_g = 0$ V 附近), 这说明虽然有PMMA垫层的阻隔, 但只要主要掺杂源亦即有机物残留不去除, 电荷依然可以在石墨烯与光刻胶之间转移, 造成一定的 p 型掺杂. 这种通过聚合物薄膜的电荷转移在外延石墨烯中也有类似情况的报道^[20]. 样品浸泡在丙酮溶液中去胶后, 继续测试石墨烯场效应晶体管的转移特性曲线(黑色曲线), 发现狄拉克点左移至测量范围以内, 出现在 $V_g = 16$ V 左右, 说明光刻胶的去除使掺杂现象大大降低. 但是, 受到空气中的水、氧分子和氧化硅界面态^[21], 以及残存的极少量有机物的影响^[6], 沟道石墨烯还是存在少许 p 型掺杂. 根据跨导计算公式

$$g_m = \frac{\delta I_d}{\delta V_g}, \quad (1)$$

计算去胶后转移特性斜率得到场效应晶体管的跨

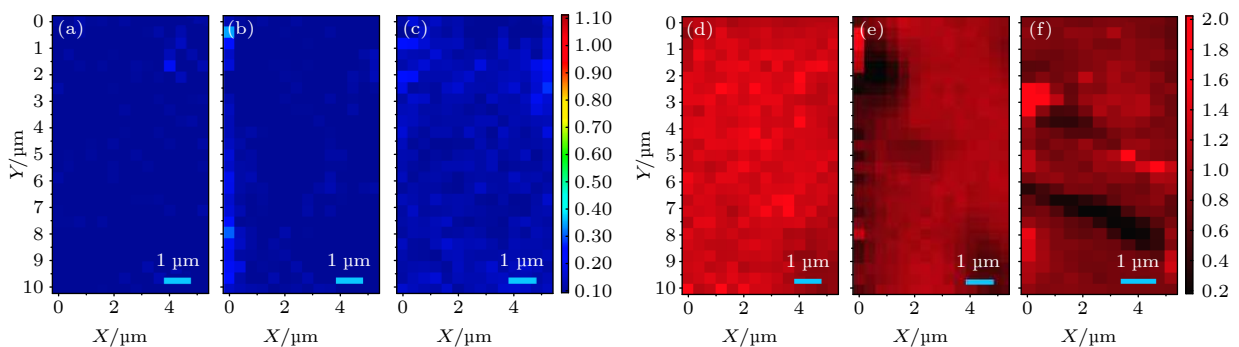


图3 (a), (b), (c) 分别是未做工艺的石墨烯、新工艺有PMMA保护、旧工艺无PMMA保护 I_D/I_G 拉曼显微成像; (d), (e), (f) 分别是未做工艺的石墨烯、新工艺有PMMA保护、旧工艺无PMMA保护 I_{2D}/I_G 拉曼显微成像

Fig. 3. (a), (b), (c) are I_D/I_G Raman mapping of graphene without processing, graphene with new processing with PMMA protection, and graphene with old processing with no PMMA protection, respectively; (d), (e), (f) are I_{2D}/I_G Raman mapping of graphene without processing, graphene with new processing with PMMA protection, and graphene with old processing with no PMMA protection, respectively.

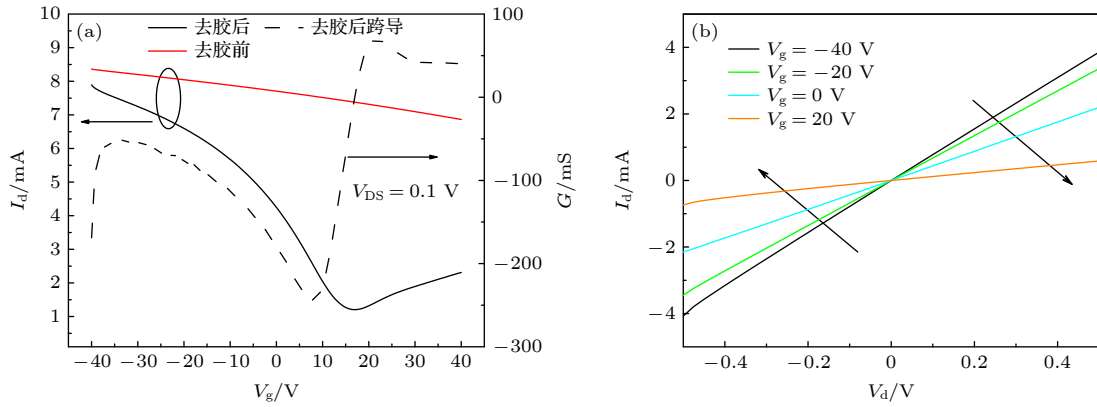


图 4 (a) 在有 PMMA 垫层保护的情况下, 去胶前后石墨烯场效应晶体管的转移特性曲线; (b) 优化后石墨烯场效应晶体管在室温下的输出特性曲线

Fig. 4. (a) In the case of PMMA underlayer protection, the transfer characteristic curve before and after removing the resist from the graphene field effect transistor; (b) output characteristic curves of the optimized graphene field effect transistor at room temperature.

导 (黑色虚线), 在 8 V 左右栅压下跨导达到最大值 0.699 mS/mm. 在跨导最大处通过石墨烯场效应迁移率计算公式

$$\mu = \frac{\delta I_d}{\delta V_g C_g V_d} \frac{L}{W} \quad (2)$$

得到最大载流子迁移率约为 $1417 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. 其中晶体管沟道长度 L 为 $7 \text{ } \mu\text{m}$; 宽度 W 为 $350 \text{ } \mu\text{m}$; 源漏电压 V_d 为 0.1 V ; C_g 为单位面积栅电容, 依据下述公式计算得到值为 $3.45 \times 10^{-4} \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$C_g = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d}, \quad (3)$$

其中, 真空介电常数 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, 氧化硅的相对介电常数 $\varepsilon_r = 3.9$, 介质层厚度 $d = 100 \text{ nm}$. 工艺中使用了 PMMA 垫层且随后去胶的石墨烯场效应晶体管的输出特性曲线如图 4(b) 所示, 源漏电极之间加 $-0.5 \sim 0.5 \text{ V}$ 扫描电压, 在 $-40, -20, 0$ 和 20 V 的栅压下, 得到的 $I-V$ 曲线处在线性区. 据图 4(b) 计算, 整个沟道和源漏接触电阻加在一起为一百多欧姆, 表明石墨烯与转移的金电极接触良好.

石墨烯直接接触紫外光刻胶会对其产生严重掺杂, 并且因此降低载流子迁移率. 在对比器件的转移特性曲线中 (见图 5, 器件 1—3 为使用 PMMA 做垫层优化工艺的器件, 器件 4 和器件 5 为对比实验中石墨烯直接接触光刻胶的器件), 直接接触紫外光刻胶的器件狄拉克点出现在 $V_g = 38 \text{ V}$ 左右, 最大场效应迁移率在 $1070 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右. 实验结果表明, 通过 PMMA 隔离紫外光刻胶技术进行

光刻, 狄拉克点偏离零点的程度得到了显著的改善, 狄拉克点电压 V_g 降低了 22 V , 更加接近 0 V , 沟道材料掺杂显著降低, 并且迁移率提升了 32% , 器件性能显著提升.

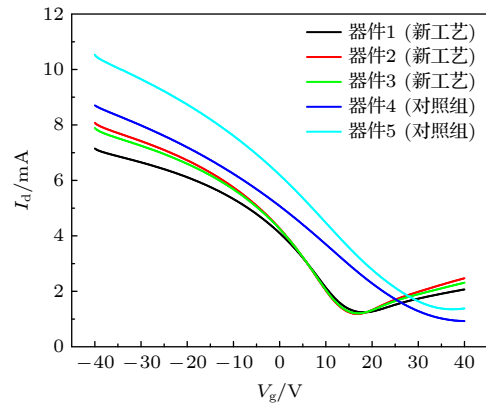


图 5 有无 PMMA 保护工艺过程的石墨烯场效应晶体管转移特性曲线

Fig. 5. Transfer characteristic curves of graphene field effect transistors with and without PMMA protection processing.

4 新工艺在 micro-LED/石墨烯场效应晶体管单片集成器件中的应用

基于 GaN 的 micro-LED 自发光显示, 是下一代新型显示技术的发展方向之一, 具有低功耗、高分辨率、长寿命等特点. 我们课题组首次提出将二维材料石墨烯场效应晶体管与 GaN micro-LED 单片集成, 开辟了二维材料晶体管新的应用方向, 但是采用传统光刻工艺制备的集成器件, 受限于

石墨烯场效应晶体管性能, 导致其对 micro-LED 的调控作用较差 (具体工艺参见文献 [5]). 采用传统紫外光刻胶接触石墨烯工艺制备的晶体管的跨导为 0.0449 mS/mm , 最大载流子迁移率仅为 $469 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. 本文提出的新工艺经过分立的石墨烯场效应晶体管验证, 可以有效提升石墨烯晶体管性能, 因此下面将其应用到 micro-LED/石墨烯场效应晶体管单片集成器件的制备工艺中. 集成器件由石墨烯晶体管串联一个 micro-LED 像素构成, 通过石墨烯晶体管对像素进行操纵和驱动, 等效电路图见图 6(a). 在最后 PMMA 辅助转移石墨烯至 GaN 衬底上进行图形化的步骤中, 采用新工艺使用 PMMA 作为垫层进行光刻, 避免直接接触紫外光刻胶, 制备石墨烯场效应晶体管, 其沟道长度 L 为 $12 \mu\text{m}$, 宽度 W 为 $480 \mu\text{m}$, 源漏电压 V_d 为 0.1 V , 栅介质为 300 nm 厚的二氧化硅, 单位面积栅介质电容 C_g 为 $1.15 \times 10^{-4} \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$. 对石墨烯晶体管和 micro-LED 这两个集成器件组成单元分别进行测试

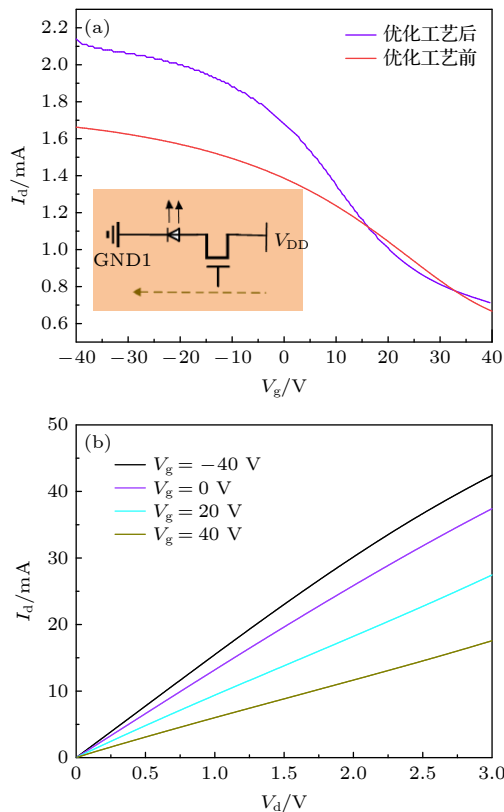


图 6 室温下石墨烯场效应晶体管的场效应特性曲线 (a) 转移曲线 (插图为集成器件等效电路图); (b) 输出曲线

Fig. 6. Field effect characteristic curve of graphene transistor at room temperature: (a) Transfer curve (The insert show the equivalent circuit diagram of the integrated device); (b) output curve.

试, 石墨烯场效应晶体管在室温下的转移和输出特性曲线如图 6 所示. 如图 6(a) 所示, 由于新工艺大大降低了紫外光刻胶引入的严重掺杂, 器件在 $-40 \sim 40 \text{ V}$ 范围内有出现狄拉克点的趋势, 跨导在 $V_g = 10 \text{ V}$ 处达到最大值 0.1042 mS/mm , 相较于传统工艺 (在 $V_g = 25 \text{ V}$ 处达到最大跨导仅为 0.0449 mS/mm) 得到大幅提升. 最大载流子迁移率由传统光刻工艺的 $469 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 提升到了 $1087 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

采用氧化铟锡作电流扩展层, 制作台面大小为 $50 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的 GaN micro-LED 的开启电压相较于以前的 5.8 V 显著降低, I - V 特性曲线如图 7 所示 (插图为 micro-LED 电致发光的照片), 开启电压为 2.8 V . 从图 7 可以看出, 该 micro-LED 在 5 V 的正向电压下工作电流高达 50 mA , 这是它高亮度的原因之一.

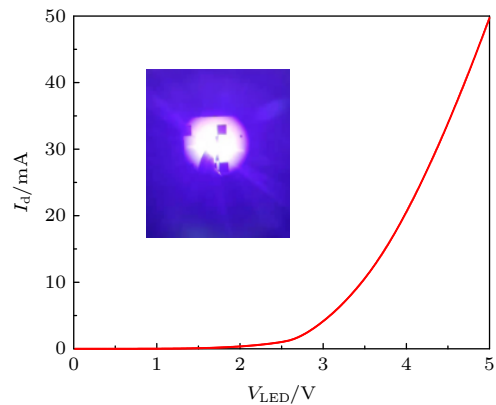


图 7 GaN micro-LED 的 I - V 特性曲线 (插图为 5 V 正向电压下的电致发光照片)

Fig. 7. I - V characteristic curve of the GaN micro-LED (The insert shows the light emission photo under 5 V forward voltage).

最后对集成器件进行整体的测试, micro-LED 与驱动晶体管串联外加 5 V 总电压, 栅极加 $-40, 0, 20$ 和 40 V 的电压, 得到整体器件的 I - V 特性曲线, 如图 8 所示. 对比图 8(a) 和图 8(b) 可以发现, 在 $-40 \sim 40 \text{ V}$ 的栅压范围内, 采用新工艺后驱动器件对 micro-LED 的电流调控能力显著增强. 在外加电压为 5 V 时, $I_{d\text{max}}$ 和 $I_{d\text{min}}$ 的差值达到了 9.5 mA , 而石墨烯晶体管工艺优化前二者的差值不到 0.1 mA , 可见工艺优化后的石墨烯场效应晶体管作为驱动元件控制 micro-LED 的能力大大提高. 将 micro-LED 的 I - V 特性和石墨烯晶体管的输出特性曲线绘制在一个图中, 可以确定集成器件的静态工作

点(亦即交叉点),如图9所示.这幅图的物理意义是,由于晶体管与 micro-LED 串联,所以二者电流相等,也就对应于图中的交叉点.当调节栅压使晶体管电流变化时,相应地也就等于调节了 micro-LED 的电流,当电流调控范围足够大时,也就可以控制 micro-LED 的开和关.从图9可以看出,伴随着 V_g 的增大,工作点对应的 V_s 逐渐降低.当 $V_g = 40$ V 时,工作点的 V_s 接近于 micro-LED 的开启电压,表明优化工艺后石墨烯晶体管的驱动能力大幅提升.该器件有效实现了将 micro-LED 与其驱动电路单片集成,免去了巨量转移.当然,目前只是原理上验证了用二维材料晶体管驱动 micro-LED 的可行性,而实验中采用的晶体管尚不能完全关闭 micro-LED.将来采用有禁带的二硫化钨等二维半导体材料制备高开关比晶体管,辅以高介电常数栅介质,并设计更加完备的驱动电路,不仅有开关功能,还有信号补偿等功能,届时此类集成器件将在全透明新型 micro-LED 显示技术中发挥重要作用.

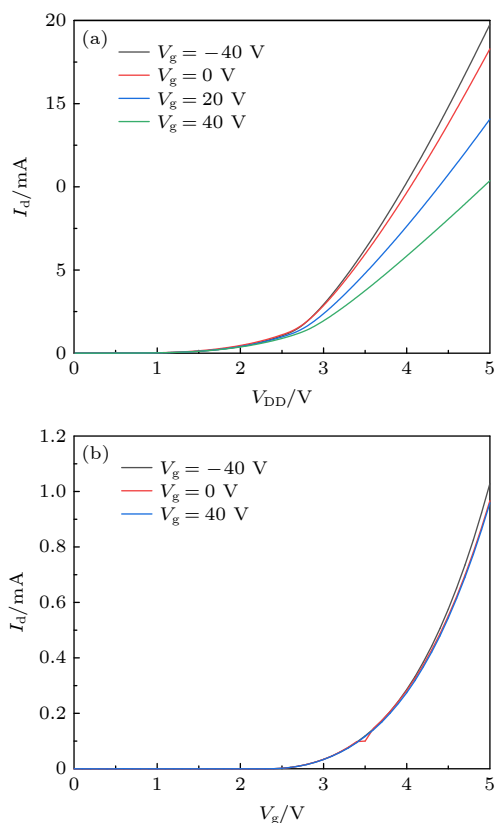


图8 (a)采用新工艺的集成器件 I - V 曲线; (b)传统光刻工艺集成器件的 I - V 曲线

Fig. 8. I - V characteristic curves of the integrated device: (a) Based on the new process; (b) based on traditional technology.

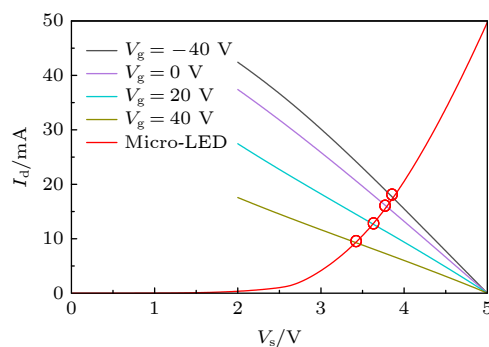


图9 集成器件的工作机制(外加总电压固定为5 V,交叉点为静态工作点)

Fig. 9. Working mechanism of the integrated device (The total applied voltage is fixed at 5 V, and the crossing point is the static working point).

5 结 论

紫外光刻胶接触二维材料产生有机物残留,引入严重掺杂,导致器件性能降低,一直是二维材料走向实际应用道路上亟待解决的难题.本文提出了一种 PMMA 薄膜垫层光刻保护石墨烯沟道输运层的工艺方法,优化石墨烯场效应晶体管的工艺流程,并将其作为驱动元件制备在氮化镓衬底上与 GaN micro-LED 串联在一起进行单片集成,规避巨量转移这一技术难题.在分立的石墨烯场效应晶体管中采用新工艺进行验证,通过和直接接触紫外光刻胶的石墨烯器件进行对比,发现新技术可以显著降低工艺制备过程中掺杂和缺陷的引入,制备的晶体管的金属电极和石墨烯接触良好,在室温条件下,最大载流子迁移率为 $1417 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,跨导为 0.699 mS/mm ,相比于直接接触紫外光刻胶的器件狄拉克点的 V_g 下降了 22 V,载流子迁移率提升了 32%,器件性能提升较为明显.随后将新工艺应用到集成器件的工艺制备过程中,将优化工艺的石墨烯场效应晶体管作为驱动电路与 GaN micro-LED 进行单片集成,其驱动能力相较于优化前得到了大幅度的提升,为二维材料晶体管的下一代显示应用提供了崭新的思路.

感谢中国科学院微电子所符亚菲在论文修改中给予的支持.

参考文献

- [1] Wu T Z, Sher C W, Lin Y, Lee C F, Liang S J, Lu Y J, Chen S W H, Guo W J, Kuo H C, Chen Z 2018 *Appl. Sci. -Basel* **8** 1557

- [2] Ding K, Avrutin V, Lzyumskaya N, Ozgur U, Morkoc H 2019 *Appl. Sci. -Basel.* **9** 1206
- [3] Liu Z J, Huang T D, Ma J, Liu C, Lau K M 2014 *IEEE Electron Device Lett.* **35** 330
- [4] Lee Y J, Yang Z P, Chen P G, Hsieh Y A, Yao Y C, Liao M H, Lee M H, Wang M T, Hwang J M 2014 *Opt. Express* **22** A1589
- [5] Fu Y, Sun J, Du Z, Guo W, Yan C, Xiong F, Wang L, Dong Y, Xu C, Deng J, Gun T, Yan Q 2019 *Materials* **12** 428
- [6] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [7] Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, Klima M, Fudenberg G, Hone J, Kim P, Stormer H L 2008 *Solid State Commun.* **146** 351
- [8] Sul O, Kim K, Choi E, Kil J, Park W, Lee S B 2016 *Nanotechnol.* **27** 505205
- [9] Lin Y C, Lu C C, Yeh C H, Jin C H, Suenaga K, Chiu P W 2012 *Nano Lett.* **12** 414
- [10] Shao P Z, Zhao H M, Cao H W, Wang X F, Pang Y, Li Y X, Deng N Q, Zhang J, Zhang G Y, Yang Y, Zhang S, Ren T L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 203105
- [11] Zhang H, Guo X, Niu W, Bao W Z 2020 *2D Mater* **7** 025019
- [12] Reina A, Jia X T, Ho J, Nezich D, Son H, Bulovic V, Dresselhaus MS, Kong J 2009 *Nano Lett.* **9** 30
- [13] Li X S, Cai W W, An J H, Kim S, Nah J, Yang D, Piner R, Velamakanni A, Jung I, Tutuc E, Banerjee S K, Colombo L, Ruoff R 2009 *Science* **324** 1312
- [14] Kang J, Liu W, Banerjee K 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 093106
- [15] Wu D, Zhang Z, Lv D, Peng Z 2016 *Mater. Express* **6** 198
- [16] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, Giacometti V, Kis A 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 147
- [17] Dean C R, Young A F, Meric I, Lee C, Wang L, Sorgenfrei K, Taniguchi T, Kim P, Shepard K L, Hone J 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 722
- [18] Li L, Yu Y, Ye G, Ge Q, Ou X, Wu H, Feng D, Chen X, Zhang Y 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 372
- [19] Ni Z, Wang Y, Yu T, Shen Z 2008 *Nano Res.* **1** 273
- [20] Lara-Avila S, Moth-Poulsen K, Yakimova R, Bjørnholm T, Falko V, Tzalenchuk A, Kubatkin S 2011 *Adv. Mater.* **23** 878
- [21] Chen J H, Jang C, Xiao S, Ishigami M, Fuhrer M S 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 206

Applications of graphene transistor optimized fabrication process in monolithic integrated driving gallium nitride micro-light-emitting diode^{*}

Yuan Ying-Kuo¹⁾ Guo Wei-Ling^{1)†} Du Zai-Fa¹⁾ Qian Feng-Song¹⁾

Liu Ming¹⁾ Wang Le¹⁾ Xu Chen¹⁾ Yan Qun²⁾ Sun Jie^{2)3)‡}

¹⁾ (Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, College of Microelectronics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

²⁾ (National and Local United Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, and Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350100, China)

³⁾ (Quantum Device Physics Laboratory, Chalmers University of Technology, Göteborg 41296, Sweden)

(Received 19 January 2021; revised manuscript received 24 May 2021)

Abstract

In the information display field, micro-light-emitting diodes (micro-LEDs) possess high potentials and they are expected to lead the direction of developing the next-generation new display technologies. Their display performances are superior to those produced by the currently prevailing liquid crystal and organic light-emitting diode based technologies. However, the micro-LED pixels and their driving circuits are often fabricated on different wafers, which implies that the so-called mass transfer seems to be inevitable, thus facing an obvious bottleneck. In this paper, the emerging graphene field effect transistors are used as the driving elements and integrated onto the GaN micro-LEDs, which is because the pixels and drivers are prepared directly on the same wafer, the technical problem of mass transfer is fundamentally bypassed. Furthermore, in traditional lithographic process, the ultraviolet photoresist directly contacts the graphene, which introduces severe carrier doping, thereby leading to deteriorated graphene transistor properties. This, not surprisingly, further translates into lower performances of the integrated devices. In the present work, proposed is a technique in which the polymethyl methacrylate (PMMA) thin films act as both the protection layers and the interlayers when optimizing the graphene field effect transistor processing. The PMMA layers are sandwiched between the graphene and the ultraviolet photoresist, which is a brand new device fabrication process. First, the new process is tested in discrete graphene field effect transistors. Compared with those devices that are processed without the PMMA protection thin films, the graphene devices fabricated with the new technology typically show their Dirac point at a gate voltage (V_g) deviation from $V_g = 0$, that is, 22 V lower than their counterparts. In addition, an increase in the carrier mobility of 32% is also observed. Finally, after applying the newly developed fabrication process to the pixel-and-driver integrated devices, it is found that their performances are improved significantly. With this new technique, the ultraviolet photoresist no longer directly contacts the sensitive graphene channel because of the PMMA protection. The doping effect and the performance dropping are dramatically reduced. The technique is facile and cheap, and it is also applicable to two-dimensional materials besides graphene, such as MoS₂ and h-BN. It is hoped that it is of some value for device engineers working in this field.

Keywords: graphene, gallium nitride, micro-light emitting diode, polymethyl methacrylate

PACS: 75.55.Cr, 75.75.-c, 85.35.-p, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.70.20210122

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2018YFA0209000) and the Fujian Provincial Innovation Laboratory of Optoelectronic Information Technology Project, China (Grant No. 2021ZZ122).

† Corresponding author. E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jie.sun@fzu.edu.cn