

石墨烯/硅异质结光电探测器的制备工艺与其伏安特性的关系

杨亚贤 张国青

Relationship between the preparation process of the graphene/silicon hetero-junction photodetector and its voltage-current characteristics

YANG Ya-xian, ZHANG Guo-qing

引用本文:

杨亚贤, 张国青. 石墨烯/硅异质结光电探测器的制备工艺与其伏安特性的关系[J]. *中国光学*, 2023, 16(5): 1149–1156. doi: 10.37188/CO.2022–0259

YANG Ya-xian, ZHANG Guo-qing. Relationship between the preparation process of the graphene/silicon hetero-junction photodetector and its voltage-current characteristics[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1149-1156. doi: 10.37188/CO.2022-0259

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0259>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Se和有机无机钙钛矿异质结的宽光谱光电探测器制备及其光电特性研究

Fabrication and photoelectric properties of organic–inorganic broad–spectrum photodetectors based on Se microwire/perovskite heterojunction

中国光学 (中英文). 2019, 12(5): 1057 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1057>

基于石墨烯的光学控制窄带太赫兹开关

Optically controlled narrowband terahertz switcher based on graphene

中国光学 (中英文). 2018, 11(2): 166 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0166>

石墨烯太赫兹波动态调制的研究进展

Recent progress in terahertz dynamic modulation based on graphene

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 86 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0086>

氧化石墨烯的多色发光及其在荧光成像中的应用

Multicolor fluorescent emission of graphene oxide and its application in fluorescence imaging

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 377 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0377>

集成PIN光敏元的CMOS探测器光电响应特性研究

Study on the photo response of a CMOS sensor integrated with PIN photodiodes

中国光学 (中英文). 2019, 12(5): 1076 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1076>

横向收集结构锗硅半导体雪崩探测器的设计研究

Design and research of Ge/Si avalanche photodiode with a specific lateral carrier collection structure

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 833 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0833>

文章编号 2097-1842(2023)05-1149-08

石墨烯/硅异质结光电探测器的制备工艺与其伏安特性的关系

杨亚贤, 张国青*

(西安工程大学理学院, 陕西西安 710048)

摘要:通过湿法转移二维材料与半导体衬底形成异质结是一种制备异质结光电探测器的常见方法。在湿法转移制备异质结的过程中,不同的制备工艺细节对二维材料与半导体形成的异质结的性能有显著影响。本文以典型的二维材料石墨烯(Gr)为例,采用湿法转移制备了一系列相同的Gr/Si异质结光电探测器,对其制备工艺与伏安特性的关系进行了详细研究。实验结果显示,梯度式烘干工艺可以显著降低Gr/Si异质结器件的暗电流,最佳的烘干温度峰值为170°C,170°C以上漏电流基本不再有变化。Gr/Si范德华异质结表面杂质与夹层中的残留水分对异质结的漏电流有显著影响。Gr/Si范德华异质结的选择性刻蚀和退火工艺也能够大幅降低漏电流。因此,合适的烘干工艺、选择性刻蚀工艺、退火工艺在Gr/Si异质结器件的制备过程中非常必要。这些结果对于使用湿法转移方法制备二维材料异质结器件具有一定的参考价值。

关键词:石墨烯;异质结;制备工艺;伏安特性;烘干;刻蚀;退火

中图分类号:TN248.1 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2022-0259

Relationship between the preparation process of the graphene/silicon hetero-junction photodetector and its voltage-current characteristics

YANG Ya-xian, ZHANG Guo-qing*

(School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangg_356@163.com

Abstract: Wet transferring two-dimension (2D) material to a semiconductor substrate is a common method to prepare a hetero-junction photodetector. When preparing to wet transfer a hetero-junction, different preparation details have significant effects on the properties of the hetero-junction formed by the 2D materials and semiconductors. In this paper, a series of identical Gr/Si hetero-junction devices were prepared by the wet transfer method and the relationship between its preparation technique and the voltage-current characteristics was studied in detail. The experimental results show that the gradient drying process can significantly reduce the dark current of the Gr/Si hetero-junction photodetector, the optimal drying temperature peak is 170 °C,

收稿日期:2022-12-30; 修订日期:2023-02-05

基金项目:国家自然科学基金(No. 11975176);陕西省自然科学基金(No. 2022JQ-660);人工结构功能材料与器件陕西省重点实验室基础研究基金(No. AFMD-KFJJ-21207)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11975176); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2022JQ-660); Basic Research Fund of Shaanxi Provincial Key Laboratory of Artificial Structural Functional Materials and Devices (No. AFMD-KFJJ-21207)

and the leakage current basically no longer changes above 170 °C. The surface impurities and residual water in the inter-layer of Gr/Si van der Waals hetero-junction has a significant effect on the leakage current of the hetero-junction. The selective etching and annealing process of a Gr/Si van der Waals hetero-junction can also greatly reduce the leakage current. Therefore, a suitable drying process, selective etching process and annealing process are each necessary in the preparation of a Gr/Si hetero-junction photodetector. These results can give reference to the fabrication of two-dimensional material hetero-junction devices by the wet transfer method.

Key words: graphene; hetero-junction; preparation technology; voltage-current characteristics; drying; etching; annealing

1 引言

近年来, 纳米科技的发展为突破基于传统体材料的光电探测器的瓶颈提供了新的可能, 二维材料的出现更为高性能光电探测器件的研制注入了活力^[1-2]。石墨烯因具有高载流子迁移率、高导电性、高热导性、高透光性等优点, 被广泛应用于光电子器件领域^[3-4]。基于石墨烯/半导体异质结的光电器件在光学检测^[5-6]、化学和生物传感^[7]、光通信^[8]等领域的应用越来越广泛^[9]。目前基于石墨烯及其异质结制备的光电器件性能逐渐提升, 在提高器件的响应度、探测效率, 扩展光波长响应范围等方面表现出巨大的潜力^[10-12]。

Gr 异质结光电器件的主要制备方法有 Gr 诱导生长法^[7,13]和 Gr 转移法^[14]。其中 Gr 诱导生长法是以衬底材料为生长基底, 使用化学气相沉积 (CVD)、物理气相沉积 (PVD)、分子束外延 (MBE) 等方法, 将 Gr 直接生长在衬底材料上^[10]。该方法简单易操作, 且成膜覆盖率较高, 但是在附着层生长的过程中需对实验参数 (如温度, 生长反应材料, 腔内气体流速等) 进行严格把控, 且对于图形化的衬底而言, 在图形窗口区域生长的 Gr 的特性与其他区域差别很大, 甚至无法生成 Gr。Gr 转移法主要包括干法转移、湿法转移^[15]。干法转移是指在转移材料的过程中, 没有溶液的参与, 采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 或者热释放胶带 (TRT) 等作为载体将二维材料转移至衬底上^[16]。该方法能够避免衬底与 Gr 之间夹层出现水分和杂质, 从而有利于提升器件性能, 但是该方法实际操作较为复杂, 实验技巧要求高, 难以大面积转移。特别是对于制备光电器件必备的图形化衬底而言, 较高的图形台阶使干法转移的石墨烯

并不能够完整地贴合在图形窗口内的衬底上, 操作过程中也由于 PDMS 或 TRT 剥离不彻底, 不可避免地存在一定的机械应力作用, 这会进一步造成石墨烯层的破损, 降低良品率。转移法制备 Gr 异质结的另一种常见方法是湿法转移, 它是指在二维材料的剥离和转移过程中需要溶液辅助的转移方法^[17-18]。对于图形化衬底而言, 湿法转移可以使得 Gr 与图形化衬底更好地贴合且不易破损。湿法转移操作方法较为简单, 良品率较高。

目前, 已经有较多采用湿法转移制备的 Gr/Si 异质结用于光电探测的报道。2015 年, 浙江大学徐杨等人利用湿法转移工艺制备了基于石墨烯/二氧化硅/硅雪崩光电探测器, 其在反向 5 V 偏压下的暗电流为 10^{-5} A/cm²^[19]。2016 年, 王雪等人基于湿法转移工艺研制的基于 Gr/Si 肖特基结的光电探测器, 在 0.5 V 下的漏电流为 10^{-9} A/cm²^[20]。2020 年, Wang Y M 等人使用湿法转移在 Gr/Si 之间加入氧化石墨烯 (GO) 来抑制暗电流, 将光电流提高了 2.75 倍^[21]。虽然文献报道的有关湿法转移制备的 Gr/Si 异质结的漏电水平已经较好, 然而湿法转移制备工艺细节对 Gr/Si 异质结性能的具体影响鲜有报道。一方面, 在湿法转移过程中, Gr/衬底 Si 夹层中难免会有水分的存在, 水分的存在对于器件的性能通常是不利的, 因此, 在烘干过程中, 烘干温度通常需要超过 100 °C^[22], 这会使夹层中的水分快速地沸腾, 从而导致表层的 Gr 层破损, 造成 Gr 层的连通性下降, 进而导致器件性能较差, 甚至损坏。另一方面, 石墨烯转移的过程中, 通常需要将聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl methacrylate, PMMA) 等支撑层旋涂至 Gr 层表面, 进行保护和支撑, 如果支撑层物质去除的不彻底, 存在残留, 也可能导致器件性能下降。目前, 尚未见到关于湿法转移过程中,

烘干工艺和支撑层残留对 Gr/Si 异质结光电探测器电学性能的影响的专门报道。基于此, 本文进行了深入研究, 针对 Gr/Si 夹层中可能存在水分的问题, 对湿法转移制备的一系列相同的 Gr/Si 异质结器件, 使用不同的烘干工艺进行了对比研究。针对支撑层可能存在残留的问题, 对 Gr/Si 异质结是否采取退火工艺进行了对比研究。

2 Gr/Si 异质结制备与测试方法

图 1 为 Gr/Si 异质结光电探测器的结构示意图, 其制备工艺流程图见图 2, 主要步骤如下:

(1) 在外延生长了 50 μm 厚的 N-型外延层

(电阻率约 16 $\text{ohm}\cdot\text{cm}$) 的 $\langle 100 \rangle$ 晶向的低电阻率 N 型区熔硅衬底上, 采用湿法氧化 300 nm 的二氧化硅薄膜。通过光刻与刻蚀技术, 在二氧化硅薄膜上开 1 mm 见方的硅窗口, 裸露出硅衬底, 用以与石墨烯形成范德华异质结。

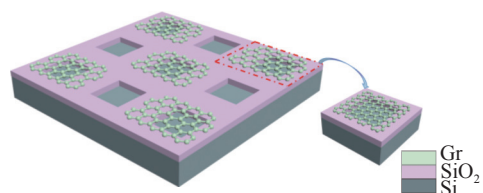


图 1 Gr/Si 异质结光电探测器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of Gr/Si hetero-junction photo-detector

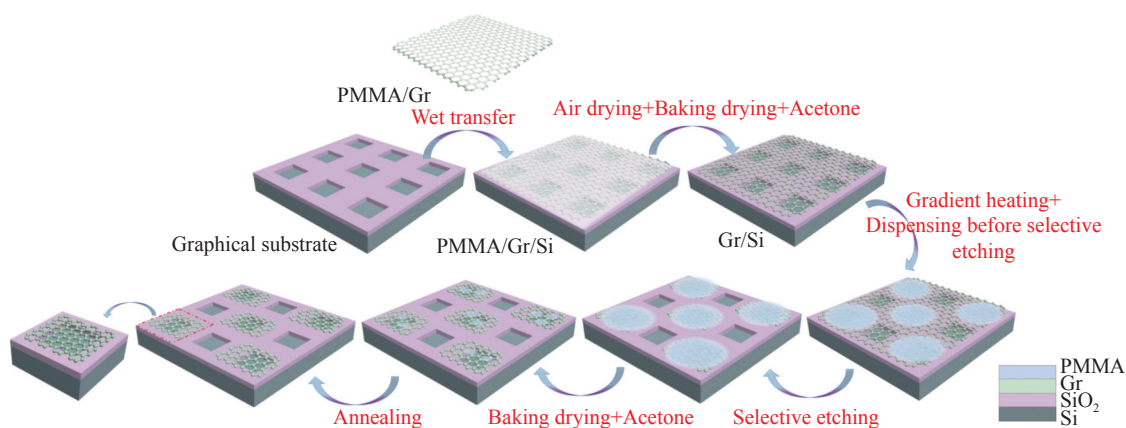


图 2 Gr/Si 异质结光电探测器制备工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of Gr/Si hetero-junction photodetector preparation

(2) Gr 转移至衬底。首先对 Si 衬底进行超声清洗, 准备 Gr, (本文中使用的 Gr 为 ACS(先进化学供应公司, Advanced Chemicals Supplier)生产的一步转移式 Gr, 无需再次旋涂 PMMA), 将 Gr 转移至带有硅窗口的衬底上。在转移过程中, 要尽量避免 Gr 在水中漂浮的过程中下层产生气泡, 使用载玻片将气泡逐渐去掉, 直到气泡几乎无法被观察到为止。将衬底斜入水中, 缓缓将 Gr 捞起, 使得 Gr 居于衬底中部, 此时将转移好的样品进行自然风干, 将样片放置在滤纸上, 用培养皿覆盖避免灰尘落入, 静置 1 h。

(3) 异质结样片烘干。将样片放置在预热好的热板上, 采用梯度式升温, 避免升温蒸发过快, 造成 Gr 被气泡顶破。整个烘干过程完成后, 将样片自然冷却至室温, 在洁净的培养皿中倒入一定

量丙酮, 将样片浸泡在丙酮中除胶, 热板预热 45 $^{\circ}\text{C}$, 加热丙酮 2 h, 加速 PMMA 溶解, 更换丙酮浸泡 12 h, 使用另一洁净培养皿盖住, 减少丙酮挥发, 同时避免灰尘进入。除胶进程结束后, 使用无水乙醇对残留在样品表面的丙酮溶液进行清洗, 使用洗耳球将乙醇吹干, 样片置于滤纸上, 盖上培养皿静置待乙醇挥发完全, 将其置于提前预热好的热板上恒温(50 $^{\circ}\text{C}$)烘干。

(4) 石墨烯选择性刻蚀, 用以将不同的异质结器件隔离开来, 同时刻蚀掉大部分非光敏区的石墨烯。将 PMMA 点在氧化硅窗口上方的 Gr 层上保护局部的 Gr。点胶时为避免点与点间的 PMMA 晕开粘连, 提前将其放置在预热好的热板上加热 60 $^{\circ}\text{C}$ 点胶。这样既加速了 PMMA 的凝固, 也保证 PMMA 点胶的均匀性。整个点胶过程

完成后,将热板升温至 85 °C,凝固 PMMA 15 min,将样片置入氧等离子体清洗机(JL-V05,深圳金徠)腔体内,进行氧等离子体干法刻蚀,射频功率为 70 W,氧气流量为 40 mL/min,刻蚀时长为 2.5 min。然后,对刻蚀后的样片进行除胶,此处除胶步骤与转移烘干后的除胶步骤一致,但是由于点胶 PMMA 层厚度较大,因此水浴加热丙酮的过程所需时间略长,除胶步骤完成后对其进行 170 °C 烘干 40 min。

(5)退火。最后对整个样片进行退火处理,将样片放入 CVD 退火炉中进行退火处理。退火时为 Ar 气氛保护,在 400 °C 下退火 2 h。退火处理一方面是为了进一步去除转移前的 Gr 外表面的 PMMA 与刻蚀时的 PMMA,另一方面溶液转移过程中残留的可挥发的杂质也会由于在 CVD 中退火被带走,同时夹层中可能依然残余的水分,也会被带走。经上述制备流程,即可得到 Gr/Si 异质结。

制备好的 Gr/Si 异质结首先进行了表面形貌和拉曼光谱表征,然后进行了光电特性参数表征。表面形貌使用金相显微镜(BX53M,中国奥林巴斯(Olympus)公司生产)表征,对硅表面石墨烯的拉曼光谱,使用英国雷尼绍(Renishaw)公司制造的显微共聚焦激光拉曼光谱仪(inVia Reflex,激发光源为 Ar 离子激光器,波长为 514.5 nm)测试。Gr/Si 异质结光电探测器电学特性测试使用的是手动探针台(镀金钨针, MULIT MODO, 美国 VEECO 公司生产),利用半导体参数测试仪(4155C,美国 Agilent 公司生产,电流测量精度为 10 fA)给异质结施加不同偏压,同时测量对应的电流,电流随偏压的变化曲线即为伏安特性曲线。将伏安特性曲线数据按照欧姆定律计算,即可得到异质结光电探测器件的静态电阻随偏压的变化情况。在黑暗条件下,给 Gr/Si 异质结光电探测器加反向偏压,测量得到的电流为暗电流 I_D 。在本文中,使用可调激光光源(波长为 525 nm,入射光斑面积为 5.15 mm²,功率调节范围为 0~0.7 W,北京宏蓝光电 AC90)给 Gr/Si 异质结器件照射光,测量得到的电流 I_{tot} 即为净光电流 I_{ph} 与暗电流 I_D 之和。

在本文中光响应度 R (Responsivity)^[23-24]、信噪比 SNR(Signal to Noise Ratio)、增益 G (Gain)^[16] 的计算公式分别为:

$$R = \frac{I_{ph}}{P}, \quad (1)$$

$$SNR = \frac{I_{ph}}{I_D}, \quad (2)$$

$$G = \frac{I_{ph}}{I_{ph0}}, \quad (3)$$

其中 I_{ph} 为净光电流, $I_{ph} = I_{tot} - I_D$, P 为入射到异质结光电探测器的光功率。式(3)中, I_{ph0} 表示反向偏压较小,异质结器件没有增益时的净光电流。

3 实验结果与分析

3.1 Gr/Si 异质结器件的基本表征

图 3 为 Gr/Si 异质结表面 Gr 的拉曼光谱图,可见,与缺陷相关的 D 峰(1350 cm⁻¹)较弱,表明石墨烯材料缺陷较少,根据 G 峰和 2D 峰的强度比例大于 2,可以判断出 Gr 的层数为单层^[4]。图 4 (彩图见期刊电子版)为选择性刻蚀后的 Gr/Si 异质结金相显微图。从图中可以看出 Gr 被 PMMA

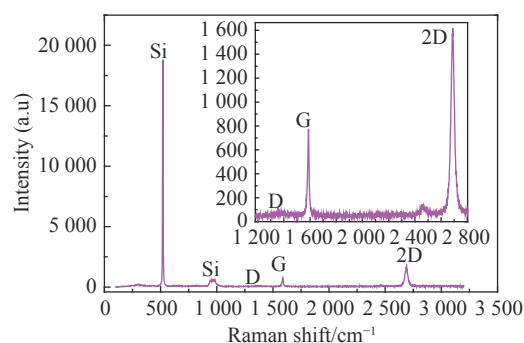


图 3 转移到图形化 Si 衬底表面的 Gr 拉曼谱图

Fig. 3 The Raman spectrum of the Gr transferred to a patterned Si substrate surface

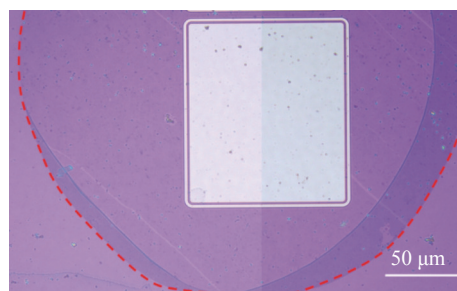


图 4 选择性刻蚀退火后的 Gr/Si 异质结整体金相显微图(石墨烯边界沿着红色虚线圆圈)

Fig. 4 The metallographic micrograph of the Gr/Si heterojunction after selective etching annealing (graphene boundary along the red dotted circles)

保护得较为完整,连接性良好,未看到明显破损。图中白色图形区域为 Si 衬底表面无 300 nm 的 SiO₂ 的区域。白色图形区域内、外可见的斑点是湿法转移过程中的杂质或 PMMA 胶的残留。

3.2 烘干工艺对 Gr/Si 异质结暗电流的影响

图 5(彩图见期刊电子版)为在黑暗环境下测得的不同烘干温度条件下 Gr/Si 异质结的反向 I-V 曲线(烘干时间均为 60 min)。从图中容易看出随着烘干温度的增加,暗电流下降明显,说明高温烘干处理有利于减小异质结器件暗电流的产生。通过进一步观察可以看出,100 °C 及以上的烘干温度条件下,暗电流减小明显。反向偏压为 -2 V 时,100 °C 烘干温度条件下的暗电流比 90 °C 烘干温度下减小了将近 1 个量级。我们认为之所以出现这种现象,是因为在湿法转移制备过程中,Gr/Si 的夹层中残存有水分,烘干处理有利于驱赶夹层中残存的水分,进行高于 100 °C 的烘干处理时,暗电流下降明显是因为烘干温度已达到或高于水的沸点,夹层中的水分彻底汽化,从石墨烯边界或破损处排出,从而减小了异质结的暗电流。从图中还可以看出,烘干温度高于 170 °C 时,I-V 曲线几乎不再变化,因此,可以认为最佳的烘干温度为 170 °C。在实验过程中,我们还发现如果直接将样品放到超过 100 °C 的热板上,在显微镜下会看到硅衬底表面的 Gr 层存在破损和褶皱,I-V 曲线测试发现该类样品几乎不导通,少数导通的漏电也很大。经分析认为,由于 Gr/Si 异质结夹层中残留的水分快速地沸腾蒸发、鼓泡造成了

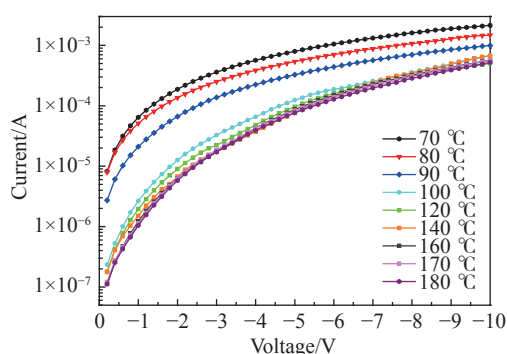


图 5 不同烘干温度条件下选择性刻蚀前大面积 Gr/Si 异质结的反向伏安特性曲线对比(黑暗遮光条件下测试)

Fig. 5 Comparison of the reverse voltage-current characteristic of large area Gr/Si hetero-junction at different drying temperatures (before selective etching under dark condition)

Gr 的破损和褶皱,使得 Gr 的连通性下降,进而造成异质结电学性能下降。

从图 5 中还可以观察到烘干工艺虽然能减小异质结的暗电流,但暗电流的绝对值相比于硅同质结依然较大,而且看不到击穿拐点,这可能是由于 Gr/Si 异质结存在较高密度的表面态,导致异质结处产生的复合电流较大^[3],从而产生了较大的暗电流。为了进一步减小 Gr/Si 异质结的暗电流,对大面积 Gr/Si 异质结进行了选择性刻蚀处理,使多个 Gr/Si 异质结独立,并且刻蚀掉了大部分未与硅接触的 Gr。

3.3 刻蚀、退火工艺对 Gr/Si 异质结暗电流的影响

图 6(a)(彩图见期刊电子版)为不同烘干、刻蚀、退火工艺条件下 Gr/Si 异质结的反向 I-V 曲

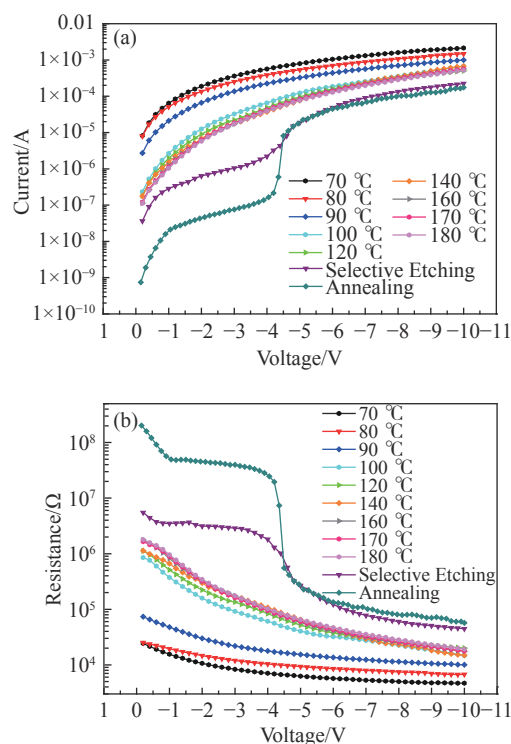


图 6 (a) 不同烘干温度、刻蚀、退火工艺条件下 Gr/Si 异质结的反向 I-V 曲线对比; (b) 不同烘干温度、刻蚀、退火工艺条件下 Gr/Si 异质结的电阻随偏压变化曲线对比(黑暗条件下测试)

Fig. 6 (a) Comparison of the reverse voltage-current characteristics of Gr/Si hetero-junction under different drying temperatures, etching and annealing processes; (b) comparison of the voltage-resistance characteristics of Gr/Si hetero-junction under different drying temperatures, etching and annealing processes(under dark condition)

线对比。根据前面 3.3 部分的讨论,这里选择性刻蚀后的烘干温度定为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 6(a) 为仅烘干后样品的 I-V 曲线进行对比,可以明显看到,选择性刻蚀后漏电流进一步降低,降低了大约 1 个量级,并且可以看到 Gr/Si 异质结的击穿拐点(击穿电压约 -4.5 V)。图 6(b)(彩图见期刊电子版)为不同烘干、刻蚀、退火工艺条件下 Gr/Si 异质反偏结的电阻随偏压变化曲线对比。从图中可以看到选择性刻蚀及退火后电阻进一步增大,在反向偏压较低时,可以达到 $100\text{ M}\Omega$ 以上。值得关注的是,通过将退火后异质结的反向 I-V 曲线与选择性刻蚀后的对比观察,可以看出在 -4 V 反向偏压下,漏电流又降低了约 1 个量级。分析认为由于高温退火减少了 Gr/Si 异质结中的可挥发性杂质和可能残留的 PMMA 胶,从而进一步降低了异质结的漏电流。这个观点可以在图 7(彩图见期刊电子版)中得到佐证。图 7 为选择性刻蚀后、退火后的金相显微图,从图 7 中两幅子图可以看出,在刻蚀与退火后,表面的杂质及可能残留的 PMMA 胶明显减少。

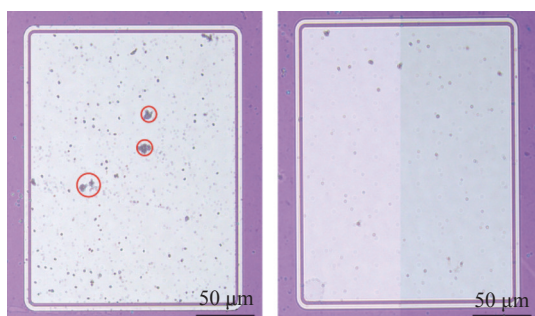


图 7 选择性刻蚀后与退火后异质结表面金相显微图(左为刻蚀后,右为退火后,红色圆圈内为较明显的可挥发性杂质或可能残留的 PMMA 胶)

Fig. 7 Metallographic micrograph of the surface of the hetero-junction after selective etching and annealing (left: after etching, right: after annealing. Red circles are relative obvious volatile impurities or possible residual PMMA glue)

3.4 Gr/Si 异质结的光响应特性

图 8(彩图见期刊电子版)中红色空心三角连线和红色实心三角连线分别为加光前后的反向 I-V 特性曲线,照射 Gr/Si 异质结的光功率密度为 $5.53 \times 10^{-6}\text{ W/cm}^2$ 。可以看到加光后总电流增加了 1 个量级以上,说明 Gr/Si 异质结的光响应

明显。蓝色实心圆连线为 Gr/Si 异质结的光电流增益随偏压的变化曲线,可以看出偏压超过 4.5 V 后,增益开始大于 1,并且增益随着偏压的增加而增加。偏压为 -9 V 时,增益达到了 48。图 9 为 Gr/Si 异质结的光响应度 (R) 和信噪比 (SNR) 随偏压的变化曲线,可以看到反向偏压在 -1.7 V 时 SNR 达到了 23.7,光响应度峰值可以达到 25.6 A/W 。这与文献 [20] 中报道的 1 mm^2 光敏面积的 Gr/Si 异质结光电探测器的典型响应度接近。这些结果说明 Gr/Si 异质结在经过选择性刻蚀、退火工艺处理后,在漏电水平大幅度降低的同时,还能保证其光电特性不变差。这些结果为制备高度集成的 Gr/Si 异质结光电器件工艺提供了一定参考。

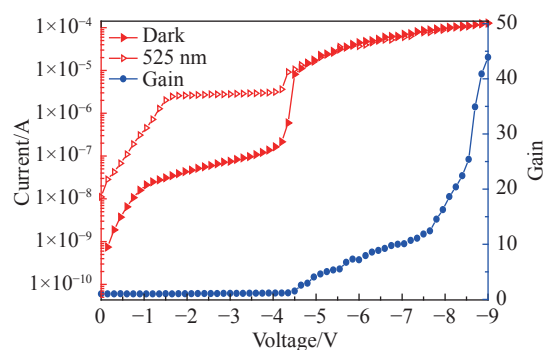


图 8 选择性刻蚀、退火后 Gr/Si 异质结的反偏伏安特性与增益曲线

Fig. 8 Reverse voltage-current characteristics and gain curves of Gr/ Si hetero-junction after selective etching and annealing

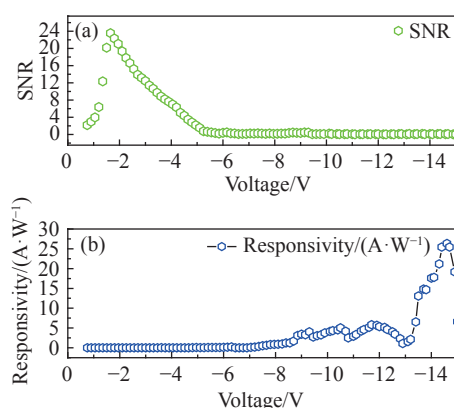


图 9 (a) Gr/Si 异质结的信噪比 (SNR) 随偏压的变化曲线 (SNR: Signal to Noise Ratio); (b) Gr/Si 异质结的光响应度随偏压的变化曲线

Fig. 9 (a) The SNR of the Gr/Si hetero-junction at different bias voltages. (b) The responsivity of the Gr/Si hetero-junction at different bias voltages

4 结 论

梯度式烘干工艺可以显著降低 Gr/Si 异质结器件的漏电流,最佳的峰值烘干温度为 170 °C,170 °C 以上漏电流不再有变化。Gr/Si 范德华异质结的选择性刻蚀和退火工艺也能够大幅降低

漏电流。Gr/Si 范德华异质结夹层中的残留水分以及杂质对异质结的漏电流有显著影响。因此,选择合适的烘干工艺、选择性刻蚀工艺及退火工艺在 Gr/Si 异质结器件的制备过程中是必要的。这些结论对于使用湿法转移方法制备二维材料异质结器件具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 朱森. 石墨烯/硅异质结光电探测器性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
ZHU M. Study on the graphene/silicon heterojunction photodetectors[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [2] 张翼鹏, 王雪, 纪佩璇, 等. 不同响应机制下的石墨烯基光电探测器研究进展[J]. *发光学报*, 2022, 43(4): 552-575.
ZHANG Y P, WANG X, JI P X, *et al.*. Research progress of graphene based photodetectors under different response mechanisms[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(4): 552-575. (in Chinese)
- [3] 公爽, 田金荣, 李克轩, 等. 新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 18-30.
GONG SH, TIAN J R, LI K X, *et al.*. Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 18-30. (in Chinese)
- [4] 胡思奇, 田睿娟, 甘雪涛. 面向硅基光电子混合集成的二维材料探测器[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1039-1055.
HU S Q, TIAN R J, GAN X T. Two-dimensional material photodetector for hybrid silicon photonics[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1039-1055. (in Chinese)
- [5] YIN J, LIU L, ZANG Y SH, *et al.*. Engineered tunneling layer with enhanced impact ionization for detection improvement in graphene/silicon heterojunction photodetectors[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 113.
- [6] LI X M, ZHU M, DU M D, *et al.*. High detectivity graphene-silicon heterojunction photodetector[J]. *Small*, 2016, 12(5): 595-601.
- [7] 王学军. 基于二维纳米材料生物传感及光电探测技术的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2018.
WANG X J. Two-dimensional nanomaterials for biosensing and photosensing[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [8] LI F, ZHENG J B, YAO Q, *et al.*. Recent progress of silicon integrated light emitters and photodetectors for optical communication based on two-dimensional materials[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(10): 3298-3320.
- [9] GUPTA S, KUMAR R. Review—photodetection properties of graphene/silicon van der Waals heterojunction[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2022, 11(6): 061010.
- [10] 韩天亮, 唐利斌, 左文彬, 等. 石墨烯异质结及其光电器件的研究进展[J]. *红外技术*, 2021, 43(12): 1141-1157.
HAN T L, TANG L B, ZUO W B, *et al.*. Research progress of graphene heterojunctions and their optoelectronic devices[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(12): 1141-1157. (in Chinese)
- [11] DAVYDOVSKAYA D. *Photoconductivity in high-quality graphene*[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [12] 张金月, 吕俊鹏, 倪振华. 二维材料异质结高灵敏度红外探测器[J]. *中国光学*, 2021, 14(1): 87-99.
ZHANG J Y, LYU J P, NI ZH H. Highly sensitive infrared detector based on a two-dimensional heterojunction[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 87-99. (in Chinese)
- [13] AESCHLIMANN S, ROSSI A, CHÁVEZ-CERVANTES M, *et al.*. Direct evidence for efficient ultrafast charge separation in epitaxial WS₂/graphene heterostructures[J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): eaay0761.
- [14] ULLAH S, YANG X Q, TA H Q, *et al.*. Graphene transfer methods: a review[J]. *Nano Research*, 2021, 14(11): 3756-3772.
- [15] 杨珏晗, 魏钟鸣, 牛智川. 基于二维材料异质结的光探测器研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(3): 379-397.
YANG J H, WEI ZH M, NIU ZH CH. Recent progress on two-dimensional heterostructure based photodetectors[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, 49(3): 379-397. (in Chinese)
- [16] 廖俊懿, 吴娟霞, 党春鹤, 等. 二维材料的转移方法[J]. *物理学报*, 2021, 70(2): 028201.

- LIAO J Y, WU J X, DANG CH H, *et al.*. Methods of transferring two-dimensional materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(2): 028201. (in Chinese)
- [17] 吴玉玲, 毕瑞可, 张杰, 等. 石墨烯湿法转移过程工艺优化[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(8): 565-569,579.
WU Y L, BI R K, ZHANG J, *et al.*. Optimization of the wet transfer technique of graphene[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2017, 54(8): 565-569,579. (in Chinese)
- [18] 李春, 胡晓影, 何天应, 等. 二维原子晶体半导体转移技术研究进展[J]. *深圳大学学报理工版*, 2018, 35(3): 257-266.
LI CH, HU X Y, HE T Y, *et al.*. Recent progress on transfer techniques of two-dimensional atomically thin semiconductor[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2018, 35(3): 257-266. (in Chinese)
- [19] 徐杨, 万霞, 郭宏伟, 等. 基于石墨烯/二氧化硅/硅的雪崩光电探测器及制备方法: 中国, CN104300027A [P]. 2015-01-21.
XU Y, WAN X, GUO H W, *et al.*. Avalanche photodetector and preparation method based on graphene/silica/silicon: CN, 104300027A [P]. 2015-01-21. (in Chinese)
- [20] 王雪. 基于石墨烯/硅肖特基结的光电探测器的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
WANG X. Photodetectors based on graphene/silicon schottky diode[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [21] WANG Y M, YANG SH M, LAMBADA D R, *et al.*. A graphene-silicon Schottky photodetector with graphene oxide interlayer[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2020, 314: 112232.
- [22] LIANG X L, SPERLING B A, CALIZO I, *et al.*. Toward clean and crackless transfer of graphene[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(11): 9144-9153.
- [23] HAN J Y, WANG J. Photodetectors based on two-dimensional materials and organic thin-film heterojunctions[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(1): 017103.
- [24] 李云杰, 付津滔, 聂长斌, 等. 石墨烯/硅异质结光电导型探测器光电响应及噪声[J]. *微纳电子技术*, 2022, 59(8): 732-741.
LI Y J, FU J T, NIE CH B, *et al.*. Photoresponse and noise of graphene/silicon heterojunction photoconductive detector[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2022, 59(8): 732-741. (in Chinese)

作者简介:



杨亚贤(1997—),女,陕西商洛人,硕士研究生,2023年于西安工程大学获得理学硕士学位,主要从事新型光电探测器工艺制备及其应用研究。E-mail: 2712016158@qq.com



张国青(1982—),男,陕西西安人,理学博士,教授,硕士生导师,2011年于北京师范大学获得理学博士学位(硕博连读),主要研究方向为新型光电子器件,重点为单光子响应探测器件的研制、理论、实验与应用研究。E-mail: zhangg_356@163.com