

基于液态金属镓制备二维氮化镓及其光电性能研究

李泽熙, 卢文杰, 王朝, 张璐, 李述体, 高芳亮

(华南师范大学 电子科学与工程学院(微电子学院), 广州 510631)

摘要: 二维氮化镓(GaN)因既具有宽禁带半导体特性, 又具有量子限域效应双重特征, 在紫外光电子领域具有广阔的应用前景。然而, 金属有机化学气相沉积和分子束外延等常用方法制备二维 GaN 通常需要较高的生长温度、较长的制备时间和相对较高的成本。针对上述关键挑战, 本研究利用液态金属镓具有低温下熔化和易氧化的特点, 研发了一种高效、相对低温的二维 GaN 制备策略。首先, 利用简单易行的旋涂剥离法, 直接从液态镓表面提取获得非晶态氧化镓(Ga_2O_3); 随后, 通过氮化处理工艺, 在相对较低的温度(850 °C)下, 对非晶 Ga_2O_3 进行处理, 成功实现了高晶体质量 GaN 的制备。研究表明, 制备的二维 GaN 厚度约为 2.2 nm, 横向尺寸为厘米量级, 晶体结构为六方纤锌矿结构。基于制备的二维 GaN 构建了光电导型紫外光电探测器, 性能测试表明在 5 V 偏置电压和 325 nm 波长紫外光照射下, 器件展示出良好的响应度(4.14 A/W)和较高的探测率(1.02×10^{13} Jones)。本研究基于液态金属镓制备了大面积二维 GaN 材料, 为开发低维高性能紫外光电探测器提供了参考借鉴。

关键词: GaN; 液态金属镓; 旋涂剥离法; 紫外探测器

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)03-0377-08

Two-dimensional GaN: Preparation Based on Liquid Metal Gallium and Photoelectric Properties

LI Zexi, LU Wenjie, WANG Chao, ZHANG Lu, LI Shuti, GAO Fangliang

(School of Electronic Science and Engineering (School of Microelectronics), South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Two-dimensional (2D) gallium nitride (GaN) exhibits broad application prospects in the field of ultraviolet optoelectronics due to its dual characteristics of wide-bandgap semiconductor and quantum confinement effect. However, conventional synthesis methods for 2D GaN, such as metal-organic chemical vapor deposition and molecular beam epitaxy, typically require high growth temperatures, prolonged processing time, and relatively high costs. To address these critical challenges, this work leverages the intrinsic properties of liquid metal gallium, including its low melting point and ease of oxidation to develop an efficient and relatively low-temperature synthesis strategy for 2D GaN. The core of this strategy includes following steps. Firstly, utilizing a straightforward spin-coating

收稿日期: 2025-05-15; 收到修改稿日期: 2025-07-03; 网络出版日期: 2025-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(62375090, 52002135, 62374062); 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515140064); 广东省自然科学基金(2023B1515120071); 广东省科技计划项目(2023A0505050131); 广东省高校特色创新项目(2023KTSCX028); 广州市科技计划项目(2024A04J6456)

National Natural Science Foundation of China (62375090, 52002135, 62374062); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2024A1515140064); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2023B1515120071); Guangdong Provincial Science and Technology Plan Project (2023A0505050131); Characteristic Innovation Project of Colleges and Universities in Guangdong Province (2023KTSCX028); Guangzhou Science and Technology Plan Project (2024A04J6456)

作者简介: 李泽熙(2000–), 男, 硕士研究生. E-mail: 2022023502@m.scnu.edu.cn

LI Zexi (2000–), male, Master candidate. E-mail: 2022023502@m.scnu.edu.cn

通信作者: 高芳亮, 研究员. E-mail: gaofl@m.scnu.edu.cn

GAO Fangliang, professor. E-mail: gaofl@m.scnu.edu.cn

exfoliation technique to directly extract an amorphous gallium oxide (Ga_2O_3) from the surface of liquid gallium. Subsequently, subjecting the amorphous Ga_2O_3 to a nitridation treatment process at a relatively low temperature of $850\text{ }^\circ\text{C}$, successfully achieved its conversion into high-crystalline-quality GaN. Characterization results demonstrate that the synthesized 2D GaN possesses a thickness of approximately 2.2 nm, a lateral dimension on the centimeter scale, and a hexagonal wurtzite crystal structure. Furthermore, based on the prepared 2D GaN, a photoconductive ultraviolet photodetector is constructed. Performance characterization results reveal that under a 5 V bias voltage and illumination by 325 nm ultraviolet light, the device exhibits a responsivity of 4.14 A/W and a high detectivity of 1.02×10^{13} Jones. This study demonstrates the successful preparation of large-area 2D GaN material based on liquid gallium metal, providing a valuable reference for the development of low-dimensional and high-performance ultraviolet photodetectors.

Key words: GaN; liquid metal gallium; spin-coating exfoliation method; ultraviolet photodetector

GaN 作为第三代半导体的典型代表,具有宽禁带、高热导率、高电子迁移率、耐高压、抗辐射、高可靠性等卓越性能。在光电子器件(如紫外探测器、高亮度发光二极管)、高频功率器件及量子信息领域展现出广泛应用前景^[1-5]。相比于块体 GaN 材料,二维 GaN 具有原子级厚度和高活性表面,这两个优点结合可以使材料表现出更加优秀和有趣的性能^[6],如二维 GaN 具有更大的带隙^[7],光致发光(PL)发射峰会发生蓝移和更高的内量子效率^[8]。并且超薄厚度赋予了它们光学透明度和更大的柔韧性,而面内共价键则赋予了它们出色的机械强度,这两个特性使二维 GaN 材料具有更大的异质集成潜力,可作为柔性器件的理想材料^[9]。然而,现有制备技术(如金属有机化学气相沉积、分子束外延生长等)需依赖高温生长条件与单晶衬底(如蓝宝石、硅衬底等),导致制备成本较高、工艺较复杂,且较难实现超薄二维结构的可控制备^[10-11]。因此,探索一种低温、高效的二维 GaN 制备技术已成为该领域的关键挑战。

近年来,液态金属以其独特的物理化学性质为二维材料的制备提供了全新思路。其中,液态金属镓因其低熔点(熔点 $29.76\text{ }^\circ\text{C}$)、低毒性、高表面张力及自发氧化特性而备受关注^[12-15]。研究表明,液态镓表面可在大气环境下自发形成纳米级 Ga_2O_3 ,该氧化层的生长动力学可以根据 Cabrera-Mott 模型描述:金属和氧化物界面上的电荷积累会形成电场,该电场促进了金属-氧化物界面金属离子的跃迁,降低了金属离子转变所需的活化能。随着氧化层厚度的增加,电场强度减小,金属离子的迁移速率减小。这一自发过程产生的氧化层厚度为几纳米^[16]。2018 年,Chen 等^[8]开发了一种表面限制氮化的方法,实现了在钨衬底上直接制备横向尺寸高达 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、

厚度为 4.2 nm 的二维 GaN。2019 年, Syed 等^[17]首先通过挤压印刷的方法得到厚度约 1.4 nm 的二维 Ga_2O_3 , 然后对二维 Ga_2O_3 进行氮化,最终得到厚度为 1.3 nm、光学带隙为 3.5 eV、载流子迁移率为 $21.5\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的二维 GaN。Zhang 等^[18]采用 N_2 等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 工艺对挤压印刷得到的 Ga_2O_3 进行处理,制备了横向尺寸为厘米量级,禁带宽度为 4.9 eV、厚度为 0.8 nm 的二维 GaN。尽管通过液态金属镓制备二维 GaN 已取得较大进展,但是实现均匀性好、重复性高的制备方法仍然是二维 GaN 发展和实际应用的主要挑战。

针对上述问题,本研究利用简单的旋涂剥离法从液态金属镓表面提取二维 Ga_2O_3 ,通过氮化处理将提取的二维 Ga_2O_3 转化为高晶体质量的二维 GaN。基于此二维 GaN 制备了光电导型光电探测器,并系统表征了材料的形貌、晶体结构以及器件的光电探测性能。实验结果表明制备的二维 GaN 的横向尺寸为厘米量级,厚度约为 2.2 nm。所制备的紫外光电探测器在 5 V 偏压和 325 nm 波长光照射下,器件响应度和探测率分别为 4.14 A/W 和 1.02×10^{13} Jones。本研究所采取的制备方法可获得大面积尺寸和高晶体质量的二维 GaN 材料,为开发低维高性能半导体器件提供了基础。

1 实验方法

1.1 材料制备

二维 GaN 的制备流程示意图如图 1 所示。在进行实验之前,需要对二氧化硅衬底进行清洗,具体步骤如下。首先,将二氧化硅衬底依次浸泡于丙酮、异丙醇和去离子水中,分别超声 15 min;然后将衬

底置于等离子体清洗机中, 射频功率为 100 W, 清洗时间为 5 min, 对衬底表面进行氧等离子体表面处理。由于氧等离子体的氧自由基不仅可以去除衬底表面的残留物, 还可以破坏 Si-H 或 Si-OH 键, 形成 Si-或 Si-O 悬空键, 从而增加衬底与 Ga_2O_3 之间的相互作用力, 因此通过氧等离子体处理能够形成更加均匀、质量更好的 Ga_2O_3 [19-20]。二维 GaN 的制备分两步, 第一步是液态金属镓表面氧化层的提取, 首先在经过氧等离子体表面处理的衬底上放置一个镓小球(约 0.5 g), 在加热平台上进行均匀加热, 使镓从固态转变成液态, 以 4500 r/min 速度旋涂 30 s。待旋涂结束后, 用棉签蘸取热乙醇擦除衬底表面残留的液态金属, 使二维 Ga_2O_3 保持洁净; 接着通过退火得到高度结晶的二维 Ga_2O_3 。第二步是采用化学气相沉积法通过氮化反应将二维 Ga_2O_3 转化为二维 GaN, 首先将 Ga_2O_3 样品放置在管式炉中合适的加热区, 在开始加热前, 先用机械泵将石英管内的空气抽走, 重复三次, 消除空气对实验的影响, 然后以 20 °C/min 的加热速率将温度升高到 850 °C。当温度达到 800 °C 时, 开始通入流量为 40 sccm(标准立方厘米每分钟)的氮气作为氮源, 以流量为 10 sccm 的氩气作为载气将氮气输送到反应区, 在 850 °C 下保温 15 min, 反应结束后, 停止通入氮气, 继续通入氩气直到炉内温度达到室温, 即可得到二维 GaN。

1.2 器件制备

首先用氮气吹扫二维 GaN 表面, 去除表面灰尘。然后通过光刻工艺, 在 GaN 表面光刻出尺寸 100 nm×1000 nm、线距 5 μm、叉指对数 5 对的叉指电极阵列。最后采用蒸镀机蒸发 10 nm/40 nm 厚

度的 Ti/Au, 实现电极的制备。

1.3 材料表征与器件测试

使用光学显微镜、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, Phenom Pharos G2)、原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM, Dimension Edge)表征 GaN 的表面形貌。使用 X 射线衍射仪(X-ray Diffractometer, XRD, Smartlab 9kW)、高分辨率透射电镜(High Resolution Transmission Electron Microscope, HRTEM, JEM-2100HR)分析 GaN 的晶体质量。使用 X 射线光电子能谱仪(X-ray Photoelectron Spectrometer, XPS, Nexsa)测定样品的化学性质和组成。器件光电性能测试设备是自行搭建的一套测试系统, 主要包括探针台、B2902A 高精度源表、325 nm He-Cd 激光器以及衰减片。通过调节衰减片来调控紫外光功率密度, 所有测试都在大气环境下进行。

2 结果与讨论

2.1 二维 GaN 表征

通过光学显微镜照片可以清晰地观察到制备的二维 GaN 具有较大的横向尺寸(图 2(a))。为了进一步分析制备的二维 GaN 的表面形貌, 采用 SEM 和 AFM 进行测试表征。SEM 照片(图 2(b))显示, 二维 GaN 表面清洁且光滑, 没有明显颗粒杂质。AFM 照片(图 2(c)左图)进一步揭示了二维 GaN 具有高平整度。通过 AFM 对制备的二维 GaN 进行测量分析, 确定了二维 GaN 的厚度约为 2.2 nm(图 2(c)右图)。这些结果表明, 制备的二维 GaN 具有优异的表面形貌和厚度均匀性, 有利于其在光电子器件中的应用。

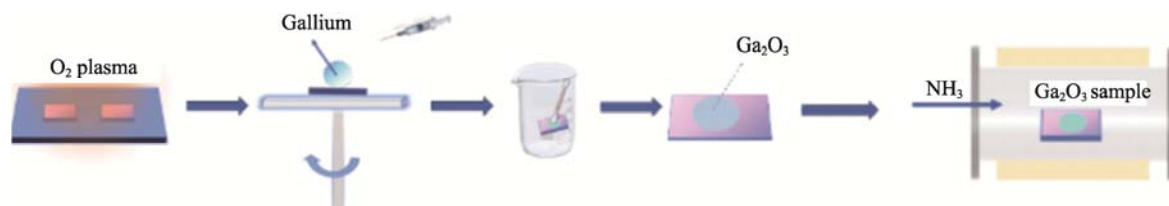


图 1 二维 GaN 制备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional GaN preparation

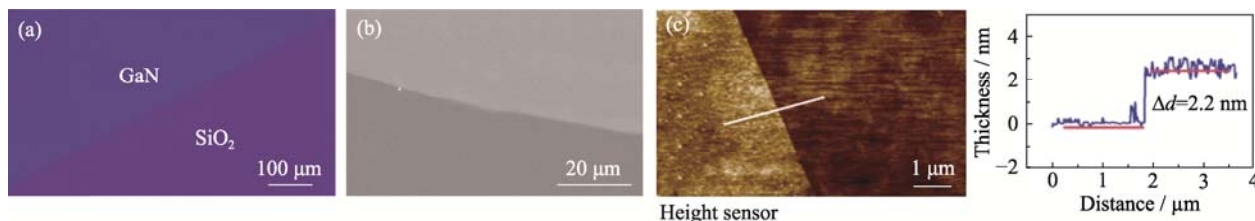


图 2 二维 GaN 的形貌表征

Fig. 2 Morphological characterization of two-dimensional GaN

(a) Optical microscope image; (b) SEM image; (c) AFM image with the right figure showing height profile

从 XRD 图谱(图 3(a))可见, 所制备的样品具有与 PDF#70-2544 相对应的衍射峰, 衍射峰强度较高且较为尖锐, 这证实了 GaN 材料样品的成功制备。值得注意的是, 在 GaN 的(100)和(102)衍射峰附近观察到微弱的杂峰($2\theta=31.69^\circ$ 和 44.73°), 通过比对 β -Ga₂O₃ 标准衍射数据(PDF#41-1103), 发现这些衍射峰可归属于未完全氮化的残留 Ga₂O₃ 相。造成这个现象的原因有两个: 首先是原料在 850 $^\circ\text{C}$ 下反应 15 min 未达到完全转化; 其次是氮化过程中氨气分压波动导致局部发生逆反应。为了进一步研究二维 GaN 的微观结构, 采用 HRTEM 对样品进行表征。从 HRTEM 照片(图 3(b))可以观察到长程有序的晶格条纹, 证实所制备的二维 GaN 材料具有单晶特征

和较高的结晶度。其中晶面间距为 0.27 nm 的条纹对应纤锌矿 GaN 晶体结构的(002)晶面, 晶面间距为 0.24 nm 的条纹则对应纤锌矿 GaN 晶体结构的(101)晶面^[21], 该结果与 XRD 分析中观察到的峰位完全吻合。

图 4(a)为 GaN 的高分辨率 XPS 全谱图, 可以观察到镓元素和氮元素分布较为均匀。图 4(b)为 N1s 核心能级谱的拟合结果, 其中 Ga-N 键(397.5 eV)是主要贡献。图 4(c)为 Ga2p 核心能级谱的拟合结果, 其中位于 1118.7 和 1145.6 eV 处的峰分别与 Ga2p_{3/2} 和 Ga2p_{1/2} 相对应, 这之前文献报道的结果一致^[17, 22]。利用二维 GaN 的吸收光谱计算其禁带宽度, 由于 GaN 是一种直接带隙半导体材料, 因此其

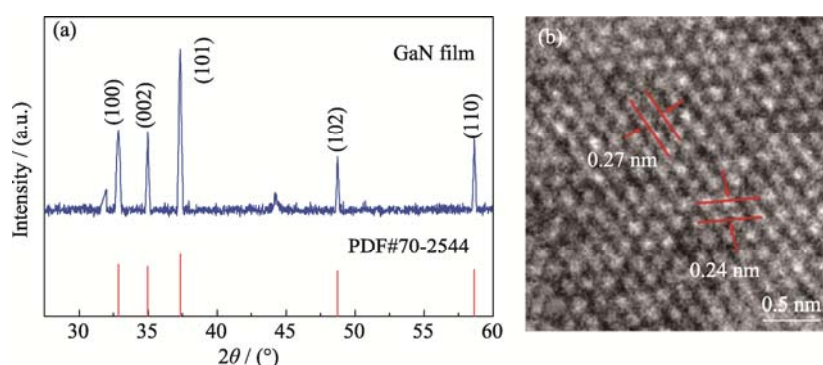


图 3 二维 GaN 的晶体结构表征

Fig. 3 Crystal structure characterization of two-dimensional GaN

(a) XRD pattern; (b) HRTEM image

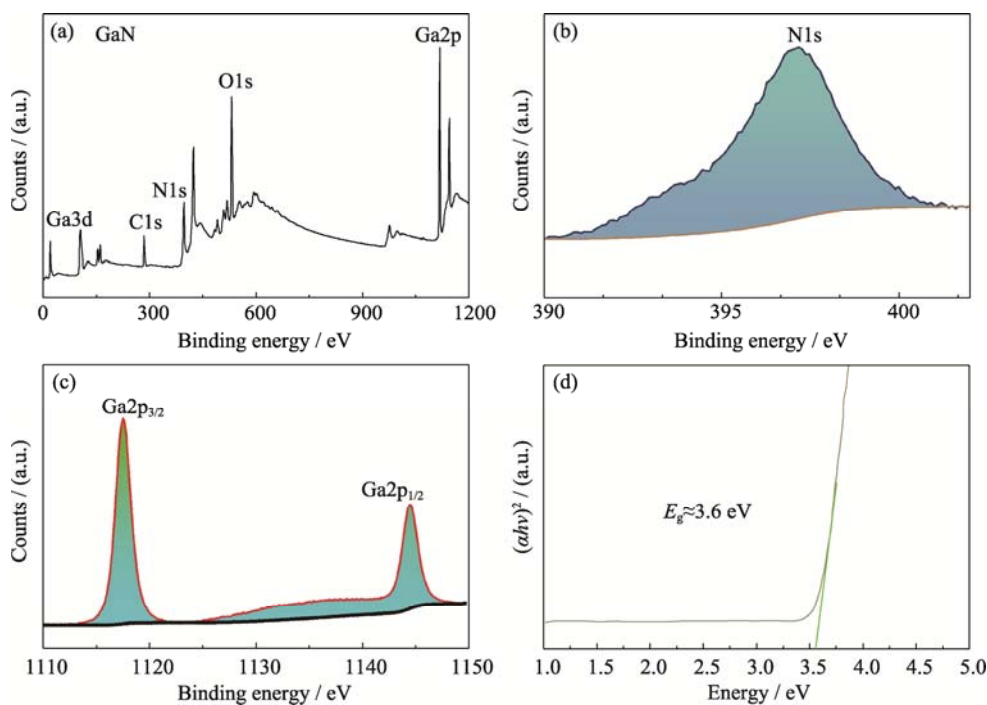


图 4 二维 GaN 的表面化学分析与光学性质表征

Fig. 4 Surface chemical analysis and optical property characterization of two-dimensional GaN

(a) High-resolution XPS total spectrum; (b) High-resolution N1s XPS spectrum; (c) High-resolution Ga2p XPS spectrum; (d) Tauc plot corresponding to the absorption spectrum

吸收光谱与禁带宽度(E_g)之间遵循幂定律的形式。对于具有直接光学跃迁的直接带隙半导体^[23], 对应的 E_g 可表示为:

$$(\alpha h\nu)^2 = B \cdot (h\nu - E_g) \quad (1)$$

其中, α 为吸收系数; $h\nu$ 为入射光子能量; B 为常数。对光吸收数据进行处理和分析后, 得到二维 GaN 的 E_g 约为 3.6 eV, 如图 4(d)所示。带隙值决定了材料的光响应范围, 仅当 $h\nu \geq E_g$ 时, 电子才能从价带跃迁至导带, 产生光生载流子。通过计算, 制备的二维 GaN 的截止波长为 344 nm, 因此后续实验中, 采用 325 nm 的紫外光研究二维 GaN 的光电响应特性。

2.2 二维 GaN 光电性能研究

图 5(a)展示了在光照强度 2.26 mW/cm^2 、波长 325 nm 紫外照射条件下和黑暗条件下光电探测器的电流-电压(I - V)特性。在 5 V 偏置电压下, 暗电流低至 $1.04 \times 10^{-10} \text{ A}$, 而光电流高达 $6.08 \times 10^{-7} \text{ A}$, 比对应的暗电流高 3 个数量级, 产生明显的光响应。图 5(b)展示了不同光功率密度下器件的 I - V 特征曲线。在负偏置电压和正偏置电压下, 随着紫外光功率密度从 $60.4 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ 增加到 $2261.5 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$, 光电流逐渐增大。图 5(c)展示了不同光功率密度下器件的时间相关(I - T)特征曲线。可以观察到 I - T 特征曲

线显示出与 I - V 特征曲线相同的趋势, 即随着光功率密度的增加, 光电探测器的光电流也会随之增大。造成该趋势的原因是随着光照强度的增加, 光电探测器产生更多的光生载流子, 从而表现出更大的光电流。图 5(d)展示了在 5 V 偏置电压下光电流随光照强度变化的特性曲线。该曲线可以用幂律拟合, 即 $I_{\text{ph}} \propto P_{\lambda}^{\theta}$, 其中 I_{ph} 为光电流与暗电流的差值 ($I_{\text{ph}} = I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}$), θ 为指数, P_{λ} 为光功率密度。拟合结果显示光电流与光功率密度呈非线性相关, $\theta = 0.86$ 略偏离理想值 1, 表明存在缺陷态、吸附和空位。这可能是由于陷阱态辅助复合的强光饱和效应: 当光功率密度升高时, 费米能级移入缺陷态分布带, 导致有效复合中心密度非线性增加, 使得净自由载流子浓度增长减缓。

为了更准确地评估光电探测器的特性, 还测试了几个光电探测器的重要参数, 如探测率(D^*)、响应度(R)、灵敏度(S)、外量子效率(EQE)和线性动态范围(LDR)。这些参数通常用以下公式计算^[24]:

$$R = I_{\text{ph}} / P_{\lambda} \cdot A \quad (2)$$

$$S = I_{\text{ph}} / I_{\text{dark}} \quad (3)$$

$$\text{EQE} = (R \cdot hc) / (\lambda \cdot q) \quad (4)$$

$$D^* = R \sqrt{A} / \sqrt{2q \cdot I_{\text{dark}}} \quad (5)$$

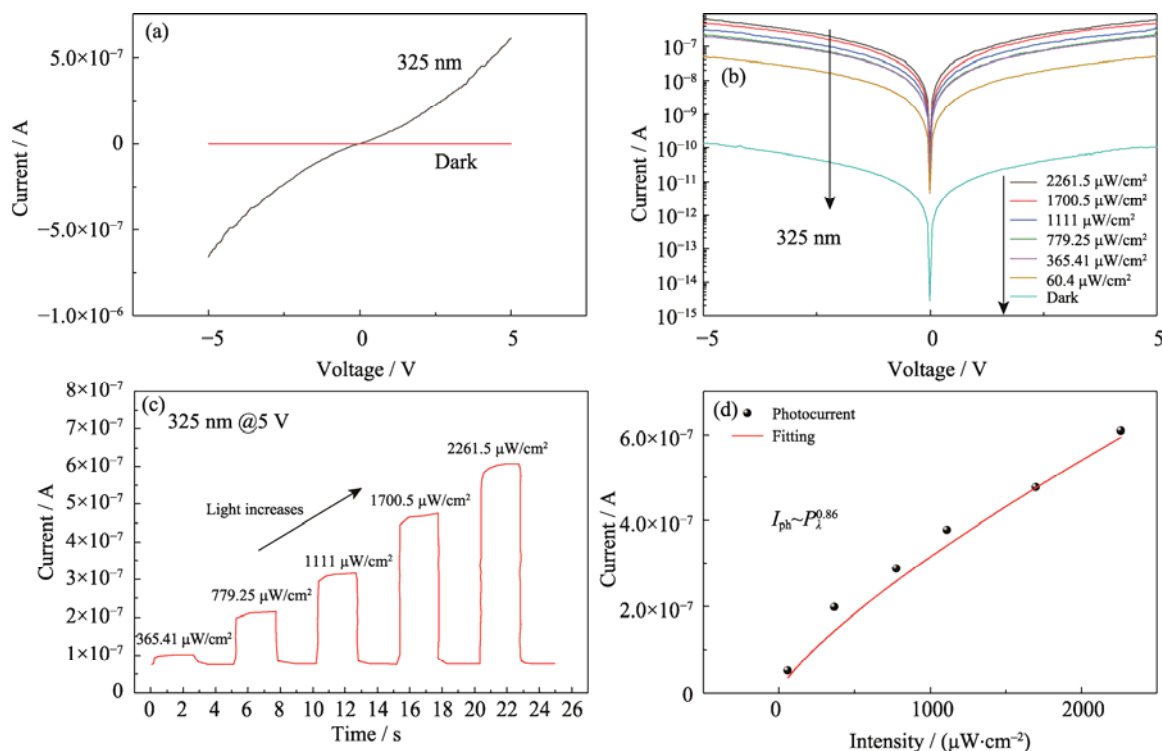


图5 二维 GaN 光电探测器的探测性能

Fig. 5 Detection performance of two-dimensional GaN photodetector

(a) I - V curves in dark and 325 nm light ($2.26 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$); (b) I - V curves of the ultraviolet light with different light intensities in the logarithmic coordinates; (c) I - T curve measured by the ultraviolet light with different light intensities; (d) Light intensity-light current power function diagram

$$\text{LDR} = 20 \lg(I_{\text{light}} / I_{\text{dark}}) \quad (6)$$

其中, I_{ph} 是光电流与暗电流的差值, P_{λ} 是光功率密度, A 是有效光照面积, I_{dark} 是暗电流, h 是普朗克常量, c 是光速, q 是电子电荷量, λ 是激发光源的波长。图 6(a) 为 5 V 偏置电压下 254、325 和 635 nm 三种波长照射光和器件响应度的关系曲线。从实验分析结果可知, 探测器在 325 nm 波长照射光条件下的响应度为 4.14 A/W, 而在 254 和 635 nm 波长照射光条件下, 器件响应度分别为 0.12 和 1.74×10^{-7} A/W。也就是说, 该器件在 325 nm 波长下的响应度优于 254 和 635 nm 波长。因此, 后面实验均采用波长为 325 nm 的照射光。图 6(b) 为 5 V 偏置电压下, GaN 紫外光电探测器的灵敏度和响应度随光功率密度变化的曲线。可以看出, 随着光功率密度的增加, 灵敏度逐渐增加, 当光功率密度为 $2261.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 器件灵敏度达到 $5.83 \times 10^5\%$ 。探测器的灵敏度随光功率密度的增加而增加, 因此光生载流子浓度也会随之增加。相反, 器件的响应度随光功率密度增加而降低, 从 $60.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时的 4.14 A/W 下降到 $2261.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时的 1.31 A/W, 这是由材料中的杂质或缺陷引起的。可能原因是在强光照下, 光生载流子数量增加, 但同时也增大了载流子的复合概率, 导致光电流的增

大不如光功率明显。图 6(c) 为 5 V 偏置电压下, 紫外光电探测器的外量子效率随光功率密度变化的曲线。当光功率密度为 $60.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 外量子效率最高, 达到 1400%。高外量子效率说明光电探测器具有较强的光电流增益, 使其非常适合紫外探测。图 6(d) 展示了光电探测器的探测率和线性动态范围。得益于合适的金属电极和电极结构, 以及二维 GaN 材料具有较高的晶体质量, 该光电探测器的探测率在光功率密度为 $60.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时达到最大值 1.02×10^{13} Jones, 优于已有报道^[25-26], 表明其在噪声环境下检测微弱信号的强大能力。而线性动态范围随着光功率密度的增加也会随之增大, 从 $60.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时的 53.8 dB 增加到 $2261.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时的 75.3 dB。线性动态范围越宽, 说明光电探测器的探测性能越好, 能够适应更广泛的光强变化, 从而在不同的光照条件下都能保持稳定的性能。上述结果表明制备的二维 GaN 光电探测器在实际应用中具有较高的灵活性和可靠性。

此外, 还进行了与时间相关的光响应测试(图 7), 光电探测器的响应时间主要与光生载流子的提取有关^[27-28]。上升时间是指紫外光开始照射探测器, 光电流达到峰值电流 90% 对应的时间; 下降时间则是指

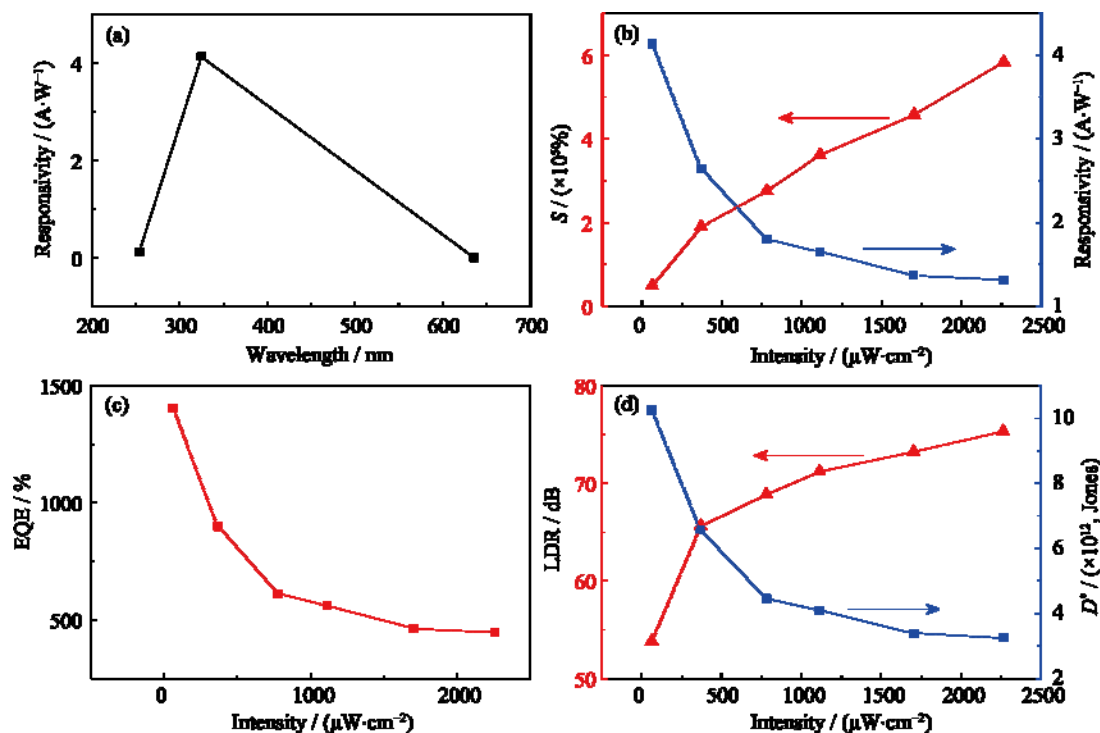


图 6 二维 GaN 光电探测器的光电性能曲线

Fig. 6 Photoelectric performance curves of two-dimensional GaN photodetector
(a) R ; (b) S and R ; (c) EQE; (d) LDR and D^*

停止紫外光照射后, 光电流下降到峰值电流 10% 对应的时间。在 5 V 偏置电压及 325 nm 紫外光照射 (光功率密度 2261.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) 下, 对器件施加周期性光开关激励, 测得该紫外光电探测器的上升时间(T_r) 为 90 ms, 下降时间(T_d) 为 70 ms, 表明其响应速度较快。以上结果表明二维 GaN 紫外光电探测器对 325 nm 紫外光具备高效光电转换能力。

表 1 列出了不同类型 GaN 紫外光电探测器的关键参数。本研究基于液态金属镓制备的二维 GaN 紫外光电探测器在响应度、外量子效率和探测率方面具有显著优势。

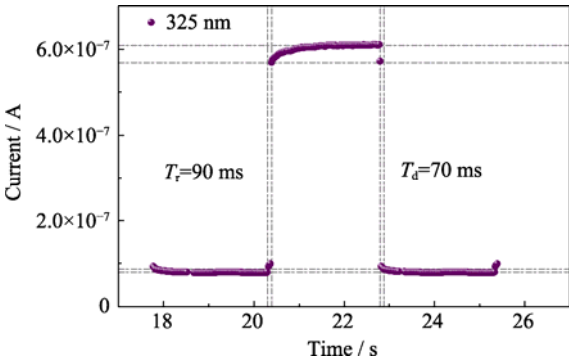


图 7 探测器的响应时间
Fig. 7 Response time of detector

表 1 不同类型 GaN 紫外光电探测器的性能对比
Table 1 Performance comparison of GaN-based ultraviolet photodetectors

Material	$R/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	EQE/%	D^*/Jones	Test voltage/V	Ref.
2D	2.01	683	5.34×10^{10}	10	[29]
Thin film	0.13	49.76	9.79×10^8	5	[30]
Porous	0.187	62.8	4.34×10^{12}	−3	[31]
Nanowires	0.023	—	4.40×10^{11}	0	[32]
Bulk	0.34	—	1.24×10^9	5	[33]
2D	4.14	1400	1.02×10^{13}	5	This work

3 结论

本研究报道了一种制备方法简易、成本低的高质量二维 GaN 材料以及相应的光电导型光电探测器。研究表明, 制备的二维 GaN 厚度约为 2.2 nm, 横向尺寸为厘米量级, 晶体结构为六方纤锌矿结构。构建的光电导型紫外光电探测器在 5 V 偏置电压和 325 nm 波长紫外光照射下, 展示出良好的响应度 (4.14 A/W)、较高的外量子效率(1400%)和较高的探测率(1.02×10^{13} Jones)。由于该方法具有加工简单、成本低且与现有半导体制备技术高度兼容等优点, 本研究基于液态金属镓制备的二维 GaN 具有较大的研究和实际应用潜力。

参考文献:

[1] DONG M, ZHENG X, LI Q, *et al.* Multi-effect coupling enhanced self-powered heterojunction ultraviolet photodetector with ultra-low detection limit. *Materials Today*, 2024, **74**: 85.
[2] CHEN K, DENG C, ZOU C, *et al.* Plasmonic hot-hole injection combined with patterned substrate for performance improvement in trapezoidal PIN GaN microwire self-powered ultraviolet photodetector. *Nano Energy*, 2022, **104**: 107926.
[3] UM D Y, CHANDRAN B, KIM J Y, *et al.* New charge carrier transport-assisting paths in ultra-long GaN microwire UV photo-detector. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33**(40): 2306143.

[4] CHAUDHURI R, BADER S J, CHEN Z, *et al.* A polarization-induced 2D hole gas in undoped gallium nitride quantum wells. *Science*, 2019, **365**(6460): 1454.
[5] QI Z G, LIU L, WANG S Z, *et al.* Progress in GaN single crystals: HVPE growth and doping. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38**(3): 243.
[6] ZHOU N, YANG R, ZHAI T. Two-dimensional non-layered materials. *Materials Today Nano*, 2019, **8**: 100051.
[7] AL BALUSHI Z Y, WANG K, GHOSH R K, *et al.* Two-dimensional gallium nitride realized via graphene encapsulation. *Nature Materials*, 2016, **15**(11): 1166.
[8] CHEN Y, LIU K, LIU J, *et al.* Growth of 2D GaN single crystals on liquid metals. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, **140**(48): 16392.
[9] WANG Z, WANG G, LIU X, *et al.* Two-dimensional wide band-gap nitride semiconductor GaN and AlN materials: properties, fabrication and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, **9**(48): 17201.
[10] YU Y, WANG T, CHEN X, *et al.* Demonstration of epitaxial growth of strain-relaxed GaN films on graphene/SiC substrates for long wavelength light-emitting diodes. *Light: Science & Applications*, 2021, **10**(1): 117.
[11] CHEN Z, ZHANG X, DOU Z, *et al.* High-brightness blue light-emitting diodes enabled by a directly grown graphene buffer layer. *Advanced Materials*, 2018, **30**(30): 1801608.
[12] DAENEKE T, KHOSHMANESH K, MAHMOOD N, *et al.* Liquid metals: fundamentals and applications in chemistry. *Chemical Society Reviews*, 2018, **47**(11): 4073.
[13] AUKARASEREENONT P, GOFF A, NGUYEN C K, *et al.* Liquid metals: an ideal platform for the synthesis of two-dimensional materials. *Chemical Society Reviews*, 2022, **51**(4): 1253.
[14] SCHEIDELER W J, NOMURA K. Advances in liquid metal printed 2D oxide electronics. *Advanced Functional Materials*,

- 2024, **34(40)**: 2403619.
- [15] HANDSCHUH-WANG S, WANG T, GANCARZ T, *et al.* The liquid metal age: a transition from Hg to Ga. *Advanced Materials*, 2024, **36(45)**: 2408466.
- [16] CABRERA N, MOTT N F. Theory of the oxidation of metals. *Reports on Progress in Physics*, 1949, **12(1)**: 163.
- [17] SYED N, ZAVABETI A, MESSALEA K A, *et al.* Wafer-sized ultrathin gallium and indium nitride nanosheets through the ammonolysis of liquid metal derived oxides. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, **141(1)**: 104.
- [18] ZHANG G, CHEN L, WANG L, *et al.* Subnanometer-thick 2D GaN film with large bandgap synthesized by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, **10**: 4053.
- [19] SZEKERES A, ALEXANDROVA S, KIROV K. The effect of O₂ plasma on properties of the Si-SiO₂ system. *Physica Status Solidi (a)*, 1980, **62(2)**: 727.
- [20] KIM J J, PARK H H, HYUN S H. The evolution of microstructure and surface bonding in SiO₂ aerogel film after plasma treatment using O₂, N₂, and H₂ gases. *Thin Solid Films*, 2001, **384(2)**: 236.
- [21] JAIN S K, SYED N, BALENDHRAN S, *et al.* Atomically thin gallium nitride for high-performance photodetection. *Advanced Optical Materials*, 2023, **11(15)**: 2300438.
- [22] ELKASHEF N, SRINIVASA R S, MAJOR S, *et al.* Sputter deposition of gallium nitride films using a GaAs target. *Thin Solid Films*, 1998, **333(1)**: 9.
- [23] KOLEY B, LAKSHAN A, RAGHUVANSHI P R, *et al.* Ultralow lattice thermal conductivity at room temperature in Cu₄TiSe₄. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, **60(16)**: 9106.
- [24] BUSCEMA M, ISLAND J O, GROENENDIJK D J, *et al.* Photocurrent generation with two-dimensional van der Waals semiconductors. *Chemical Society Reviews*, 2015, **44(11)**: 3691.
- [25] DU Y, YIN S, LI Y, *et al.* Liquid-metal-assisted synthesis of patterned GaN thin films for high-performance UV photodetectors array. *Small Methods*, 2024, **8(2)**: 2300175.
- [26] ZHANG X, LI J, MA Z, *et al.* Design and integration of a layered MoS₂/GaN van der Waals heterostructure for wide spectral detection and enhanced photoresponse. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12(42)**: 47721.
- [27] CAI K, JIN Z W. Photodetector based on two-dimensional perovskite (PEA)₂PbI₄. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38(9)**: 1069.
- [28] DONG S Y, TIE S J, YUAN R H, *et al.* Research progress on low-dimensional halide perovskite direct X-ray detectors. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38(9)**: 1017.
- [29] LI F, WU J, LUO C, *et al.* Liquid metal based synthesis of GaN nanosheets with Ag nanoparticle modification for enhanced ultraviolet photodetection. *ACS Applied Nano Materials*, 2025, **8(24)**: 12764.
- [30] AGGARWAL N, KRISHNA S, GOSWAMI L, *et al.* Inclination of screw dislocations on the performance of homoepitaxial GaN based UV photodetectors. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, **263**: 114879.
- [31] GUO Y, SONG W, LIU Q, *et al.* A porous GaN/MoO₃ heterojunction for filter-free, ultra-narrowband ultraviolet photodetection. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, **10(13)**: 5116.
- [32] ZHANG J, WANG J, FAN J, *et al.* Ultrastable and quick response UV photodetector by high crystalline orientation wurtzite/zinc-blende GaN superlattice. *Advanced Optical Materials*, 2025, **13(10)**: 2402779.
- [33] GUNDIMEDA A, KRISHNA S, AGGARWAL N, *et al.* Fabrication of non-polar GaN based highly responsive and fast UV photodetector. *Applied Physics Letters*, 2017, **110(10)**: 103507.