

GaN 外延材料及其自供电紫外光电探测器研究进展

Recent Research Progress of GaN Epitaxial Material and Its Self-powered UV Photodetector

供稿|卜俊飞, 郑旭阳, 林正梁, 胡星, 李屹, 刘平安, 李国强, 王文樑 / BU Junfei, ZHENG Xuyang, LIN Zhengliang, HU Xing, LI Yi, LIU Pingan, LI Guoqiang, WANG Wenliang

内容导读

近年来, 自供电 GaN 基紫外光电探测器凭借具有的紫外敏感性、高稳定性及便携应用等特点, 在紫外通信、紫外辐射检测以及导弹追踪等领域具有重要的应用前景。但其发展依旧面临着材料位错密度高、器件性能差、器件集成度低等问题。为了解决上述问题, 科研工作者开展系统地研究并取得了重要进展。本文从材料缺陷控制、器件结构设计和器件集成应用三个方面讨论了自供电 GaN 基紫外光电探测器的研究进展, 并展望了其发展前景。

近年来, 紫外光电探测产业呈快速增长的态势。自供电紫外光电探测器具有高响应性能、快响应速度等特点, 在紫外通信、紫外辐射检测以及导弹追踪等众多领域都有重要的应用前景^[1]。目前紫外光电探测器的主流仍为硅 (Si) 基探测器; Si 作为一种间接带隙半导体 (带隙约为 1.12 eV), 截止波长约为 1100 nm, 本征吸收不在紫外波段, 故 Si 基紫外光电探测器需加装滤光片才能实现高效紫外探测^[2]。相比之下, 新兴的氮化镓 (GaN) 材料作为一种直接带隙半导体, 具有更宽的带隙 (约为 3.4 eV) 和更好的载流子分离能力, 突破了 Si 材料的物理极限^[3-5]。

凭借 GaN 材料的能带特性, 自供电 GaN 基紫外光电探测器截止波长可达到 365 nm, 且无需加装滤

光片, 体现出远超 Si 的紫外探测潜能; 同时, GaN 出色的热导率 ($2.2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 使器件拥有优良的散热性能; 此外, 自供电 GaN 基紫外光电探测器, 可在无外加电源下运作, 具有更小的尺寸、更低的功耗^[6], 极大降低了运行成本并提高系统的便携性, 有利于器件的集成化发展。

目前, 自供电 GaN 基紫外光电探测器与外延材料已经取得长足发展; 主要涉及外延生长、结构与器件集成 3 方面。(1) 在外延生长方面, 研究人员提出插入层技术、低温生长技术和选区生长技术等控制因 GaN 与常用衬底之间存在较大的晶格失配和热失配产生的缺陷, 提升 GaN 材料晶体质量^[7]; (2) 在结构设计方面, 研究人员通过构造 p-n 异质结构、肖特基结构等, 加速材料内电子-空穴对的分

作者单位: 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510641

离,大幅度提高光利用率、响应度等性能参数;
(3)器件集成方面,探测器与加热器件、光电子器件等集成,实现多功能化利用。最后,本文还对自供电 GaN 基紫外光电探测器件发展面临的问题及前景进行讨论与展望。

外延生长

GaN 材料在生长过程中产生的缺陷主要来自于晶格失配、热失配和残余应力等,并主要以位错的形式存在于材料中。在本节中,综述了插入层技术、低温生长技术和选区生长技术这 3 种调控材料内部位错密度的方法。

插入层技术

插入层技术是一种常用的异质外延辅助技术,

可有效地控制材料缺陷。通过在衬底上预先沉积插入层,来缓解衬底与材料间因晶格失配、热失配而产生的应力,进而降低缺陷密度^[8]。此外,该技术还可提高外延材料与衬底的润湿性^[9],以获得光滑表面。

氮化铝 (AlN) 和铝镓氮 (AlGaIn) 作为常用的外延插入层材料,凭借相近的晶格参数与热膨胀系数,可减小 GaN 与衬底间的晶格失配和热失配,降低缺陷密度,提高薄膜质量和结构稳定性。2017 年, Sun 等^[10] 在四氢碳化硅 (4H-SiC) 衬底上利用厚度为 1.7 ± 0.5 nm 的超薄 AlN 或 AlGaIn 插入层获得了 GaN 材料。插入层的存在缓解了内部应力,获得的 GaN 外延薄膜边缘位错密度小于 $8.90 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$,其原子力显微镜 (AFM) 图像如图 1(a) 所示。

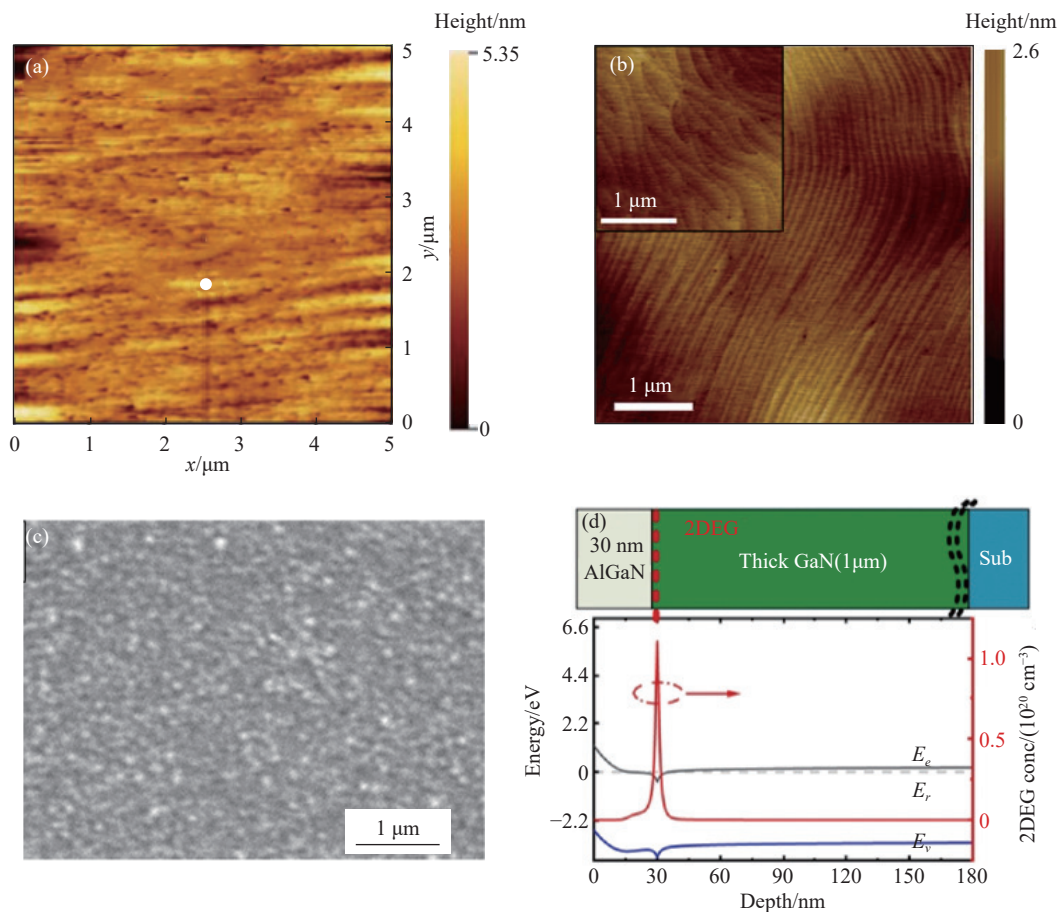


图 1 (a) 低压比下 SiC 上 GaN 的 AFM 表面形貌^[10]; (b) 90 nm 的 AlGaIn 缓冲层 GaN AFM 表征图^[11]; (c) 缓冲层作用的表面形貌^[12]; (d) 异质结构及二维电子气分布^[13]

2021 年, Feng 等^[11] 通过金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 法, 对碳化硅 (SiC) 衬底进行三甲基

铝 ($\text{C}_3\text{H}_9\text{Al}$) 预处理后再生长 GaN 外延薄膜。结果表明, 界面处形成了厚度为 90 nm 的 AlGaIn 缓冲

层。该缓冲层作为掩模，防止 GaN 外延薄膜生长过程中的位错向上穿线，有助于降低位错密度。获得的薄膜均方根粗糙度 (RMS) 低至 0.28 nm ($5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$)，螺位错密度低于 $6.5 \times 10^7\ \text{cm}^{-2}$ ，图 1(b) 为对应的原子力显微表征图，更为重要的是，该研究提供了一种生长插入层的新思路。2022 年，Arifin 等^[12]研究了低温生长的 GaN 和 AlN 作为缓冲层对非极性 GaN 生长的影响。在未含缓冲层的情况下，生长出的 GaN 薄膜为多晶结构，较低的成核率使之形成分离的岛状结构。然而，在引入缓冲层充当生长掩模后，衬底和 GaN 薄膜之间的界面能降低，加速成核岛合并，获得更光滑的表面，图 1(c) 列出了缓冲层作用下的表面形态。

除了降低位错密度，插入层还可改善薄膜的电学性能。Chen 等^[13]通过 MOCVD 沉积 414 nm 的超厚 AlN 插入层，插入层的超级背势垒 (SBB) 提升了 GaN 外延薄膜的电学性能，如图 1(d) 所示，其二维电子气 (2DEG) 迁移率可达到 $2199\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，适合应用于各类光电器件。

低温成核层技术

为进一步降低材料缺陷密度，研究人员将插入层技术延伸发展，提出低温成核层技术。此技术常被用于两步生长法中，先低温生长成核层，再高温生长功能层，位错被限制在成核层内，进而降低功能层的位错缺陷。

早在 2009 年，Kawamura 等^[14]就通过实验证明了两步生长法可降低 GaN 位错密度，如图 2(a) 所示。在此基础上，2015 年，Shang 等^[15]将这一技术应用用于 GaN 外延薄膜的制备。该团队报道了蓝宝石衬底上采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术制备高质量 GaN 外延薄膜：先在 $570\ ^\circ\text{C}$ 下生长低温层，随后升温到 $1080\ ^\circ\text{C}$ 生长功能层，在成核层中位错被充分释放，功能层贯穿位错 (Threading dislocations) 密度可低至 $2 \times 10^8\ \text{cm}^{-2}$ ，如图 2(b) 所示。

在此基础上，研究人员将低温成核层技术与其他技术相结合，获得更高质量的 GaN 外延薄膜。2018 年，Woo 等^[16]利用金属迁移增强的外延生长技术，将低温下金属催化剂形成的金属簇作为晶种，

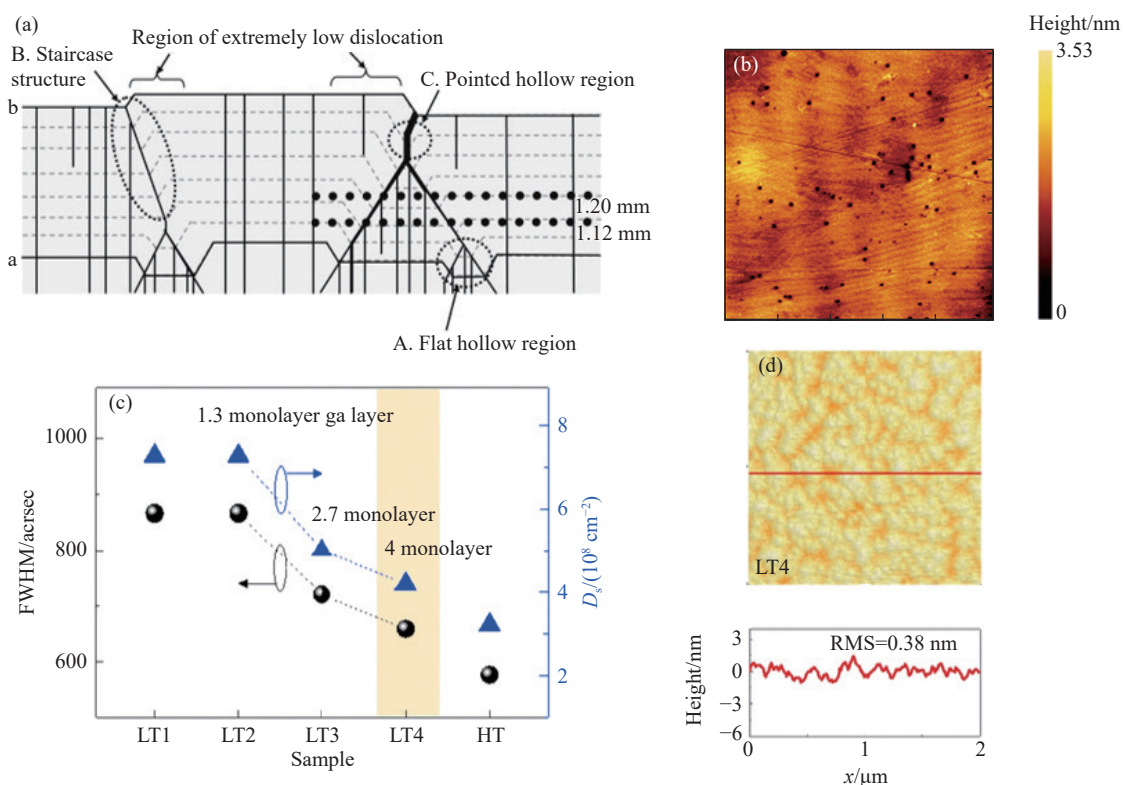


图 2 (a) 两步生长法中的生长位错还原过程^[14]；(b) 15 nm 厚度的 GaN 块体 AFM 图像 ($5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$)^[15]；(c) 不同样品螺旋位错密度^[16]；(d) LT-GaN ($2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$) 的 AFM 表征图，纵坐标表示与标记线距离^[16]

产生大量的成核位点，从而生长出螺旋位错（Screw dislocation）密度低至 $4.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 的 GaN 外延薄膜，如图 2(c) 所示。图 2(d) 所示，这种低温生长的低温氮化镓（LT-GaN）具有光滑的表面（RMS 为 0.38 nm ）。

选区生长技术

低温成核层技术便于生长大面积、低成本的 GaN 外延薄膜，但一般需要转移、刻蚀等后处理才可应用于特定器件的制备中。相比之下，选区生长技术能直接在限定区域内获得高质量 GaN 材料，降低了器件制备难度。

选区生长技术将材料的生长限制在窗口内，如图 3(a) 所示，这种技术可以抑制位错的横向迁移，减小位错衍生的概率；同时通过位错瓶颈机制，减小位错向上位移的概率^[17]；此外，还可以避免形成结合面，更好的调控纳米结构的尺寸^[18]。2000 年，Suda 等^[19] 通过选区生长首次在 3C-SiC 衬底上得到

了 GaN 外延薄膜，如图 3(b)。该团队采用 SiO_2 作为掩膜，使用金属氧化物分子束外延（MOMBE）方法，控制衬底表面上的化学反应性和几何形貌，得到了质量可观的 GaN 外延薄膜。掩膜有效限制了位错的衍生与移动，控制生长区域的同时保障了外延薄膜的质量。

此外，选区生长技术也广泛用于生长 GaN 纳米材料。2021 年，Gridchin 等^[20] 在 SiO_x/Si 衬底上利用分子束外延（MBE）选区生长得到一种高质量的 GaN 纳米线。图 3(c) 的扫描电镜（SEM）图像表明，在非晶态 SiO_x 衬底上生长得到的对照组分布密度高达 $2.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ，且出现了部分结合面，而选区生长组则为 $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，几乎不存在结合面；说明选区生长可确保生长材料的均匀分布。然而 Si 基掩膜可能带来的污染与无意掺杂限制了其使用。为解决这一问题，2020 年，Sobanska 等^[21] 利用非晶 Al_xO_y 成核层，采用压力辅助分子束外延法（PAMBE）实现了 GaN 纳米结构的选区生长， Al_xO_y 条纹诱导特

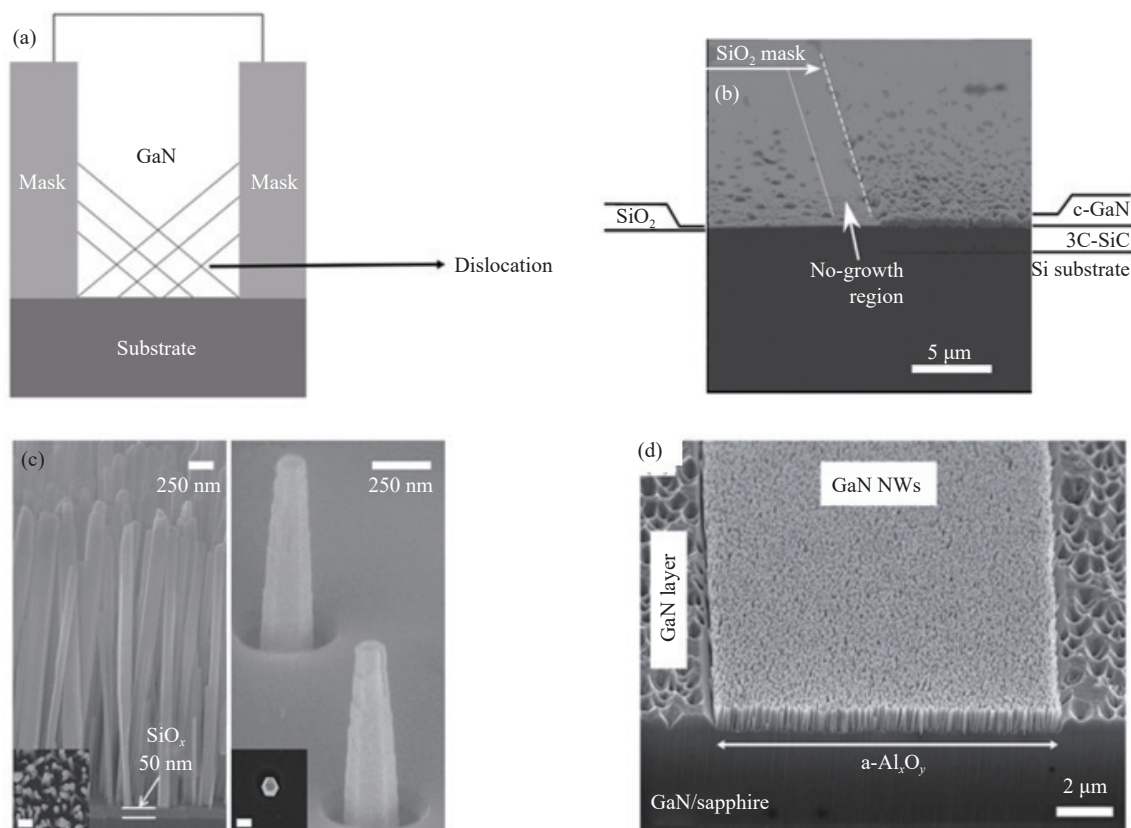


图 3 (a) 选区生长作用机理示意图；(b) 830°C 下生长层的扫描电镜横截面图像^[19]；(c) 对照组扫描电镜图像 a 与选区生长组扫描电镜图像 b^[20]；(d) 选区生长俯视图^[21]

定参数的 GaN 纳米线生成, 如图 3(d) 所示。2022 年, Oh 等^[22] 选择多晶 γ -氧化铝作为掩膜, 通过原子层沉积方法 (ALD) 实现微 GaN 阵列的选区生长。由于氧化铝基掩膜层与蓝宝石衬底材料组成相同, 降低了外延材料受污染的可能性, 显著提高 GaN 纳米线的质量。

器件设计

在不断发展的各类 GaN 外延薄膜的缺陷控制技术基础上, 研究人员对器件的结构进行优化, 得到了具有高响应度、低暗电流、低响应时间等特点的自供电光电探测器。本文将分别从 p-n 接触和肖特基接触两类形成内建电场的结构对器件设计进行介绍。

p-n 结型自供电紫外光电探测器

依托两侧半导体之间的费米能差, p-n 结型探测器可以自发形成内建电场, 具有出色的自供电潜力^[23]。p-n 结型紫外光电探测器凭借高量子效率、低暗电流、低噪声、高线性度等特点, 受到研究人员的关注。

目前, 已有大量的材料被用于和 GaN 形成 p-n 结, 如 ZnO/GaN^[24]、Ga₂O₃/GaN^[25]、SnO₂/GaN^[26]、BaTiO₃/GaN^[27] 等。其中 ZnO 有高导电性、高稳定性和成熟的制备工艺, 且与 GaN 形成的异质结具有较小的失配率, 减少了由于晶格不匹配造成的可能缺陷^[28-31], 成为出色的候选结构。

为改善 ZnO 和 GaN 两种异质材料之间较大的禁带宽度差带来的影响, 2017 年, Zhou 等^[32] 将硫化镉 (CdS) 作为插入层应用于 ZnO/GaN 异质结中, 能带结构图前后变化如图 4(a) 所示。阶梯状能带促进了载流子流通, 减少了电子空穴的复合。该器件的响应率为 $176 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$, 探测率高达 $10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$, 是同条件下无插入层器件的 6 倍。2019 年, Huang 等^[33] 对插入层技术进一步改良, 在 ZnO/GaN 异质结中引入了 CsPbBr₃ 插入层。该材料的长载流子扩散长度和低复合率增强了电子空穴对的分离, 对探测器性能的提升效果更加显著, 器件的峰值响应率和探测率分别达到了 $44.53 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $2.03 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应时间为 160 和 150 ms (分别表示上升段时间与

下降段时间)。

除了使用插入层外, 2022 年, Peng 等^[34] 改用 ZnO 纳米线代替 ZnO 薄膜, 制备了一种基于 p-GaN/n-ZnO 异质结构的自供电柔性紫外光电探测器。该研究利用纳米线结构提高光电探测器的光学吸收效率, 同时通过施加外部应变, 利用压电效应来调节 p-GaN/n-ZnO 异质结紫外光电探测器的能带结构, 增强内置电场和扩大耗尽区域来加快载流子分离, 在 325 nm、零偏压下, 检测率 ($6.82 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$) 和开关比 (7.36×10^6) 相比于同种类的薄膜器件都由极大的提升, 具有较快的响应速度, 即响应时间低至 6.9 和 6.4 ms, 如图 4(b) 所示。该研究不仅介绍了一种新的制备工艺流程, 同时为受应变调控的紫外光电探测器的发展提供了可能性。

氧化镓 (Ga₂O₃) 同样作为可与 GaN 形成异质结来制备自供电紫外光电探测器的潜力材料之一, 其超宽带隙的结构使之在深紫外光探测方面占据绝对的优势^[35-36]。2022 年, Ma 等^[37] 报道了一种自供电 Ga₂O₃/p-GaN 深紫外光电探测器, 利用 MOCVD 制备了具有原位氮氧化镓 (*In-situ* GaON) 层的 Ga₂O₃/p-GaN 异质结, 在深紫外波段有着超高响应率。如图 4(c) 所示, *In-situ* GaON 层的存在显著增强了器件对入射光的吸收能力, 在零偏压下, 254 nm 波长处具有 $3.8 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 的响应率, 响应时间为 66 和 36 ms。

然而由于掺杂剂低溶解度、天然缺陷的补偿效应、深能级杂质等因素^[38], 宽带隙氧化物和氮化物等宽禁带半导体难以获得有效 p 型掺杂, 在与 n 型材料相结合时, 产生的内建电场较弱。为改善这一问题, 部分研究人员将目光放在了具有免掺杂特性的材料上。

硫化镓 (GaS) 属于 III 族单硫族化合物 (MX), 具有天然的 p 型掺杂特性, 基于其厚度可调的能带间隙为 2.6~3.1 eV, 因此可以免去掺杂过程, 是理想材料之一。2023 年, 作者团队首次提出了将 GaS/GaN 应用于自供电紫外光电探测器中^[39], GaS/GaN 异质结具有优异的电学和光学性质, II 型能带结构产生了超强内置电场, 可以实现高灵敏度的紫外光探测。制备出的器件在 365 nm、0 V 下有超高的灵敏度和检测率 ($6.26 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$, $8.29 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$),

同时器件还具有超低响应时间, 响应时间达到了惊人的 48 和 80 μs , 如图 4(d) 所示。该研究为制备高

质量的 GaS/GaN 异质结提供了较为理想的方案, 证明了其在自供电紫外光电探测器的应用潜力。

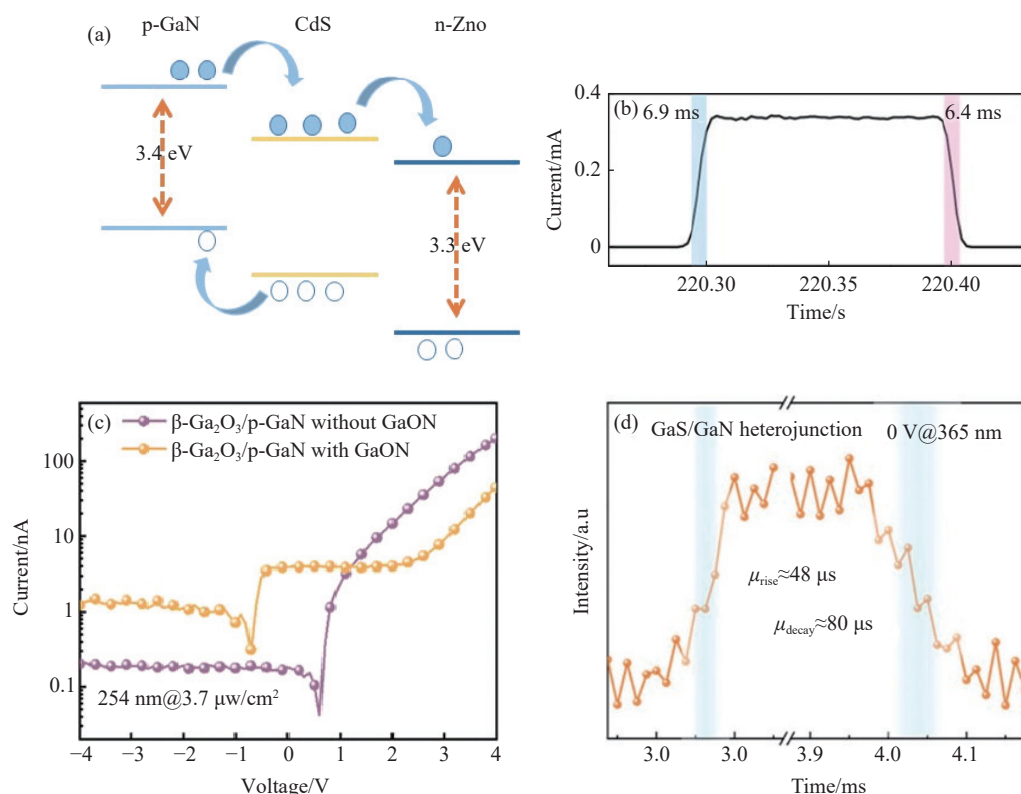


图 4 (a) 加入 CdS 后的能带图^[32]; (b) p-GaN/n-ZnO 异质结构的自供电柔性紫外光电探测器的电流-时间曲线^[34]; (c) 254 nm 光下, 有无 GaON 探测器的电流-电压曲线对比^[37]; (d) 在无偏压条件下的电流-时间曲线测量^[39]

肖特基结型自供电紫外光电探测器

相比于 p-n 结型紫外光电探测器, 肖特基结型器件具有低成本制造的优点, 更容易实现大规模生产与应用, 但肖特基接触点的稳定性和质量有待改善。到目前为止, 对不同半体制成的肖特基型自供电紫外光电探测器, 已有研究报道。

使用金属-半导体-金属 (MSM) 结构为优化肖特基结型探测器的一种常见方法^[40-43], 此结构具有较低的单位电容, 可有效地降低器件的响应时间, 同时和场效应晶体管器件高度匹配, 适合于器件的集成^[44]。2017 年, Aggarwal 等^[45]报道了使用不同尺寸金金属作为 GaN 基紫外光电探测器的电极时, 电势的分布受到金属-半导体结内金属电极的大小的影响^[46], 产生了不对称的内建电场, 在紫外光照射下形成的能带结构如图 5(a) 所示。该器件暗电流低至 90 nA, 光响应率则达到了 $132 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应时间

为 63 和 27 ms。

研究人员就 MSM 结构探测器的改良提出各类方案, 其一是加强探测器对紫外光的吸收能力。2021 年, Teker 等^[47]使用镍纳米颗粒修饰 MSM 型自供电紫外光电探测器, 入射光和金属镍中的电子振荡发生共振耦合, 使入射光子的能量极快地传递给镍纳米颗粒, 然后转移给 GaN 外延薄膜内, 增加了被激发的载流子的数目, 该现象被称为局部表面等离子元 (LSPR) 效应^[48-49]。如图 5(b) 所示, 对比未修饰器件, 光电流明显增强, 探测率从 $2.81 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$ 增加到 $7.19 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$, 暗电流低至 5.69 pA, 响应时间最低可达 50 和 95 ms。

此外, 也可以通过加强能带分布的不对称性, 促进光生载流子的分离及运输。2021 年, Wang 等^[50]在 MSM 型自供电紫外光电探测器的一侧电极下方沉积了铝镓氮 (AlGaIn) 薄膜, AlGaIn/GaN 异质结

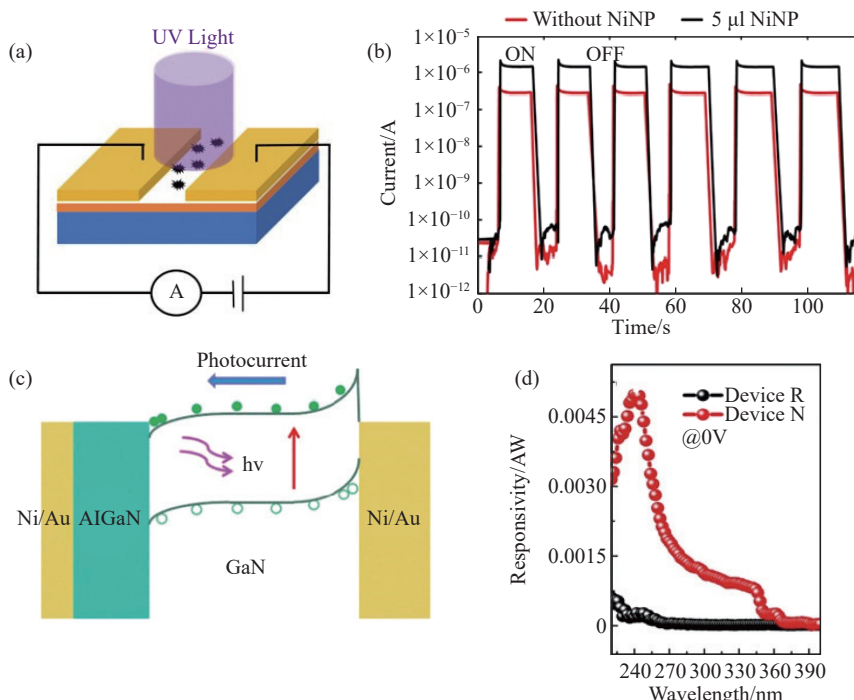


图 5 (a) 基于非对称电极的紫外光电探测器在紫外照明下的结构示意图^[45]; (b) 在 254nm 紫外照明下, 有和无纳米颗粒的零偏置的 GaN 紫外光电探测器的电流时间特性对比^[47]; (c) 加入 AlGaIn/GaN 后能带结构示意图^[50]; (d) 加入 AlGaIn/GaN 前后器件在零偏压下光谱响应率的变化^[50]

处的极化效应产生额外电场, 从而改变原有的能带结构, 如图 5(c) 所示, 加入 AlGaIn 前后光谱响应率对比如图 5(d) 所示。该器件的响应率在零偏压下为 $0.005 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 在 3 V 的偏压下能达到 $13.56 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 这一报道为 MSM 结构的紫外光电探测器提供了新的设计思路。

自供电 GaN 基紫外光电探测器集成

在自供电 GaN 基紫外光电探测器研究中, 单一器件结构难以满足日益多样的应用需求。同时当前结构设计无法抵消不利影响, 尤其在应对持续光电导等效应时显得不足。为应对这一问题, 集成技术的引入显得尤为迫切, 在克服不利效应的同时, 赋予探测器更广泛的多功能特性。

自供电 GaN 基光电探测器与微型加热器集成

研究表明, 低温下接触界面处会产生持续光电导 (PPC) 效应^[51]。PPC 效应使器件需要数小时到数天的时间恢复起始态, 阻碍了器件的连续使用。2017 年, Hou 等^[52]研究了恢复时间与工作温度的关系, 如图 6(a) 所示。他们提出设计原位加热探测器,

提高载流子俘获速率来进行缩短恢复时间^[52-53]。

基于这一思路, 2020 年, Sun 等^[54]设计了一种具有集成式微加热器的 $\text{WO}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 异质结构光电探测器。微型加热器通过连续脉冲加热的方式提高了载流子俘获速率, 将探测器的衰减时间缩短了 30%~45%, 恢复时间可以缩短到数百秒, 如图 6(b) 所示。

与此同时, 科研人员还发现集成微型加热器可以提升探测性能。2021 年, Tang 等^[55]通过研究发现, 对金属-异质结-金属 (MHM) 型探测器适当提高温度, 不但可以抑制 PPC 效应, 还可以改善载流子输运特性, 提高响应度。图 6(c) 和 6(d) 为温度变化时 MHM 型探测器电流与响应度的变化情况。对于 MHM 型 AlGaIn/GaN 探测器, 温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 250 $^{\circ}\text{C}$, 光响应度上升了约 3.5 倍, 而光电流的衰减时间下降了大约 3 个数量级, 具有出色的应用前景

自供电 GaN 基光电探测器与发光二极管集成

除了抑制 PPC 等效应外, 日益增多的市场需求对器件集成提出了新的要求。通过与发光二极管集

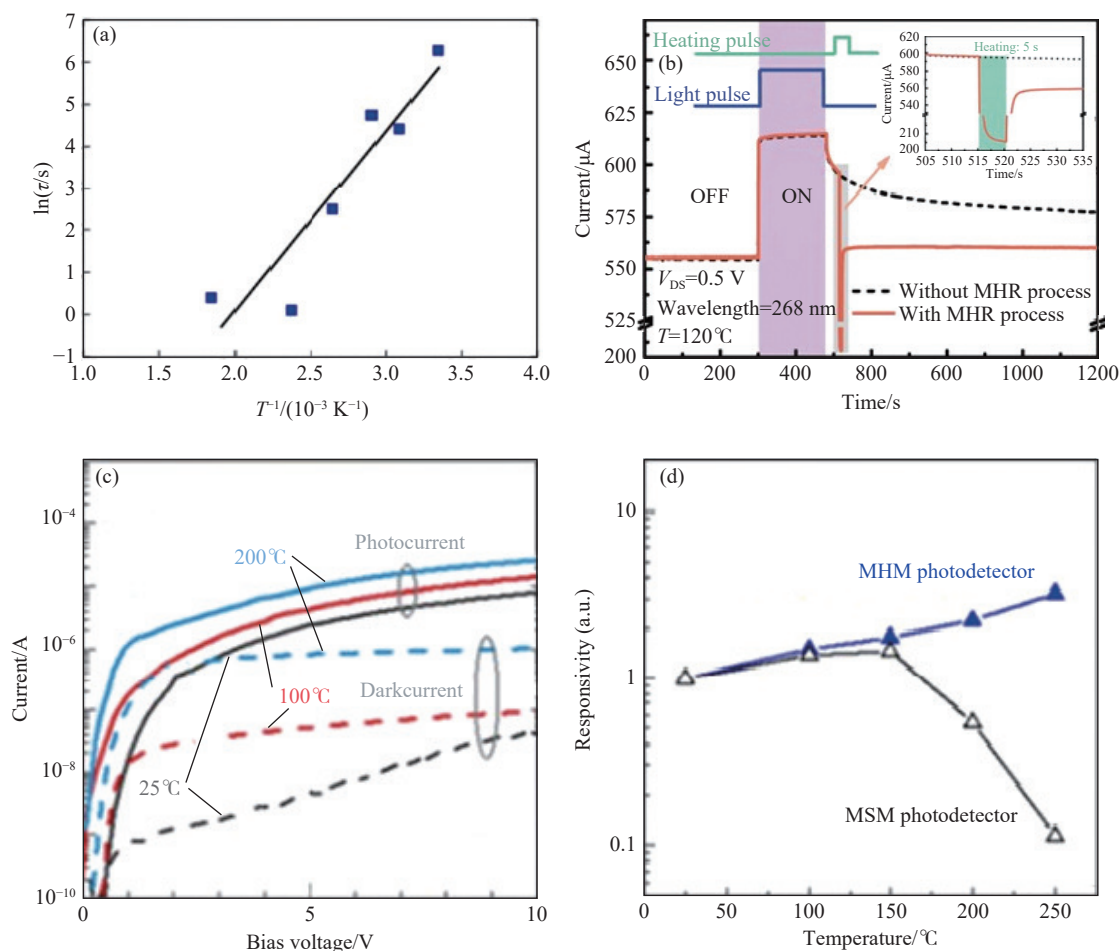


图6 (a) 恢复时间与工作温度关系^[52]; (b) 恢复时间示意图^[54]; (c) MHM 型探测器电流-温度关系^[55]; (d) 不同结构探测器响应度-温度关系^[55]

成, 探测器不但可以提升性能, 还显示出在诸多应用领域的巨大潜力, 如物联网以及显示和通信领域等^[56-57]。

2013 年, Brubaker 等^[58]报道了一种氮化物发射器与探测器的耦合, 受 PPC 效应的影响, 该集成器件的响应时间高达数百秒。为了降低响应时间, 2014 年, Tchernycheva 等^[59]将发光二极管 (LED) 与探测器通过 SiN 波导连接集成, 降低了传输距离与传输反射损失, 获得的 GaN 基光子平台电流轨迹和开关信号的过渡时间低于 0.5 s, 实现了快速响应。但他们也指出, 这种集成并未改善器件的其他性能, 如开关比、响应度等。

针对这个问题, 2021 年, Lyu 等^[57]提出了调控二维电子气 (2DEG) 的解决方法。他们基于 AlGaIn/GaN/Si 平台, 将紫外 LED 与光电探测器进行集成。通过改变 LED 端电压 (V_{LED}), 控制界面处 2DEG

中沟道的开关, 实现了超过 10^6 的开关比、高达 3.5×10^5 A/W 的响应度, 如图 7(b)~7(d) 所示。这种单片式集成在紧凑型光隔离器等许多领域具有很大的潜力, 但受电容等寄生参数影响, 在高频领域的应用仍较为有限。

为了获得更好的高频特性, 研究人员提出级联的解决方法。2022 年, Wang 等^[60]对 GaN 基 LED 和光电探测器的集成级联技术进行了优化, 从而降低了电容, 高频性能得到了显著提升, 同时暗电流也降低到 pA 数量级, 开关比达到 10^6 数量级, 如图 7(a) 所示。同年, Shi 等^[61]利用 LED 和光电探测器的集成设计并制作了一种 Si 衬底 InGaIn/GaN 多量子阱垂直结构可见光通信器件, 其数据速率可以超过 10 Gbit/s, 而误码率在一定范围内可以低至 3.8×10^{-3} , 这表明了 LED 与探测器的集成在通信领域的应用潜力。

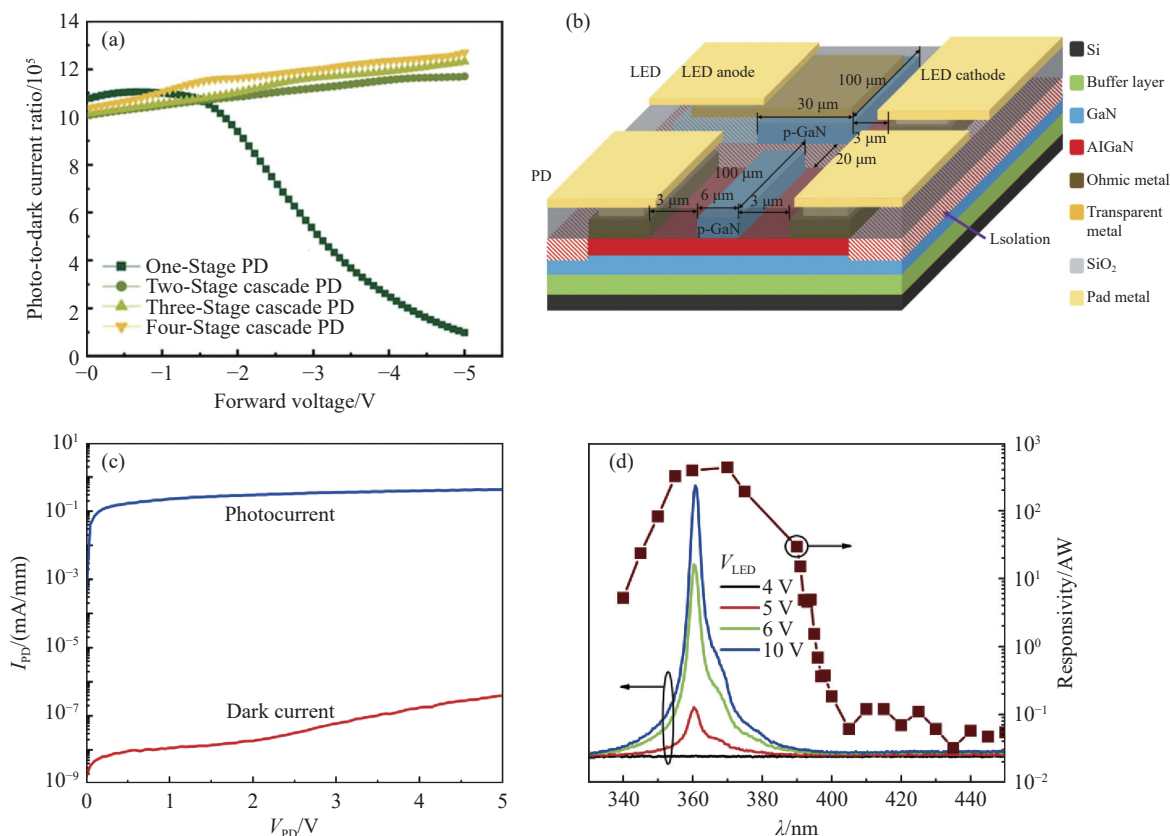


图7 (a) 开关比和级联程度、偏压关系^[60]; (b) 集成平台结构图^[57]; (c) 不同 V_{PD} 下探测器的光暗电流曲线^[57]; (d) 不同 V_{LED} 下探测器波长响应情况^[57]

总结与展望

本文从外延生长、结构设计、器件集成3个角度阐述了自供电 GaN 基紫外光电探测器的发展现状。在外延生长方面,研究人员采用插入层技术、低温生长技术以及选区生长技术等生长 GaN 外延薄膜,实现了位错密度的大幅降低,螺位错密度降低到 $6.5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ^[11]。在此基础上,通过设计器件结构,p-n 结型探测器和肖特基结型探测器的各项性能指标都得到提高,响应度从以往工作中的 44.53 mA/W ^[33] 提高到 3.8 A/W ^[38],探测率则可以达到 $7.19 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[47],比过往性能高出数十倍;响应时间低至 48 和 $80 \mu\text{s}$ ^[39]。同时,探测与微型加热器的集成使得器件连续工作能力得到了极大的改善,器件的恢复时间降低到了数秒;探测器与发光二极管的集成则让其应用领域得到了进一步的拓展,在物联网与通信显示领域崭露头角。

虽然这些研究已经取得了显著的成果,但外延

生长以及器件制备仍然面临着一些问题。针对这些问题,本文提出了一些解决方法:

(1) GaN 材料的位错密度仍处于较高水平。这需要通过发展出色的 GaN 缺陷控制技术,比如先通过选区生长引入合适的 AlN 插入层,再用低温成核层技术生长高质量的 GaN 外延薄膜或是探索开发与 GaN 材料晶格失配和热失配更小的新型衬底材料,如自支撑 GaN 衬底技术。

(2) 自供电紫外光电探测器的探测性能仍不及普通的紫外光电探测器。因此需要进一步优化器件结构与器件制备技术。一方面,可以通过增强活性层对紫外光的吸收效率,产生更多的光生载流子,比如通过沉积纳米颗粒,利用表面等离子共振效应增强吸收,或者是采用透明电极来提高紫外光透过率;另一方面,可以通过设计能带结构加强内建电场,促进电子-空穴对的快速分离。

(3) 集成器件的高频特性亟需提升。通过级联集成虽然可以提升器件的性能,但集成过程中内部

走线带来的寄生参数会影响器件在高频环境下的使用,故需要探索新型集成技术,研究寄生参数小的走线或者选择无走线的封装集成技术以提高高频特性。

综上,自供电 GaN 基紫外光电探测器以其在光电性能和半导体材料特性上的优越性,为紫外光探测领域带来了新的可能性。其独特的自供电原理、高性能的器件结构以及广泛的应用领域,使其成为当前光电技术研究的热点之一。相信在科研工作者的持续努力下,自供电 GaN 基紫外光电探测器的性能必将得到提升,实现在紫外光通信、生物医学、环境监测等领域的广泛的应用,为光电子学领域带来新的发展契机。

参考文献

- [1] Moses S R, Adorno J J, Palmer A F, et al. Vessel-on-a-chip models for studying microvascular physiology, transport, and function in vitro. *Am J Physiol: Cell Physiol*, 2021, 320(1): C92
- [2] Song W D, Chen J X, Li Z L, et al. Self-powered MXene/GaN van der Waals heterojunction ultraviolet photodiodes with superhigh efficiency and stable current outputs. *Adv Mater*, 2021, 33 (27): Art No. 2101059
- [3] Ding W H, Meng X Q. High performance solar-blind UV detector based on β -Ga₂O₃/GaN nanowires heterojunction. *J Alloys Compd*, 2021, 866: Art No. 157564.
- [4] He T, Zhao Y K, Zhang X D, et al. Solar-blind ultraviolet photodetector based on graphene/vertical Ga₂O₃ nanowire array heterojunction. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1557
- [5] Jain S K, Aggarwal N, Krishna S, et al. GaN-UV photodetector integrated with asymmetric metal semiconductor metal structure for enhanced responsivity. *J Mater Sci Mater Electron*, 2018, 29: 8958
- [6] Yan Z Y, Li S, Yue J Y, et al. Reinforcement of double built-in electric fields in spiro-MeOTAD/Ga₂O₃/Si p-i-n structure for a high-sensitivity solar-blind UV photovoltaic detector. *J Mater Chem C*, 2021, 9(41): 14788
- [7] Paskova T, Evans K R. GaN substrates—Progress, status, and prospects. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(4): 1041
- [8] Lee W, Lee S, Goto H, et al. Novel buffer layer for the growth of GaN on c-sapphire. *Phys Status Solidi C*, 2006, 3(6): 1388
- [9] Waltereit P, Brandt O, Trampert A, et al. Influence of AlN nucleation layers on growth mode and strain relief of GaN grown on 6H-SiC(0001). *Appl Phys Lett*, 1999, 74(24): 3660
- [10] Sun Z, Song P F, Nitta S, et al. A-plane GaN growth on (11-20) 4H-SiC substrate with an ultrathin interlayer. *J Cryst Growth*, 2017, 468: 866
- [11] Feng Y X, Sun H R, Yang X L, et al. High quality GaN-on-SiC with low thermal boundary resistance by employing an ultrathin AlGaIn buffer layer. *Appl Phys Lett*, 2021, 118 (5): Art No. 052104
- [12] Arifin P, Sutanto H, Sugianto, et al. Plasma-assisted MOCVD growth of non-polar GaN and AlGaIn on Si(111) substrates utilizing GaN-AlN buffer layer. *Coatings*, 2022, 12(1): Art No. 94
- [13] Chen K, Zhang Y C, Zhang J C, et al. Ultrathin GaN film and AlGaIn/GaN heterostructure grown on thick AlN buffer by MOCVD. *Ceram Int*, 2022, 48(24): 36193
- [14] Kawamura F, Tanpo M, Miyoshi N, et al. Growth of GaN single crystals with extremely low dislocation density by two-step dislocation reduction. *J Cryst Growth*, 2009, 311(10): 3019
- [15] Shang L, Lu T P, Zhai G M, et al. The evolution of a GaN/sapphire interface with different nucleation layer thickness during two-step growth and its influence on the bulk GaN crystal quality. *RSC Adv*, 2015, 5(63): 51201
- [16] Woo H, Kim J, Cho S, et al. Epitaxial growth of low temperature GaN using metal migration enhanced epitaxy for high-quality InGaIn/GaN heterojunctions. *Superlattices Microstruct*, 2018, 120: 781
- [17] Liu Y C, Deal M D, Plummer J D. High-quality single-crystal Ge on insulator by liquid-phase epitaxy on Si substrates. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(14): 2563
- [18] Park J S, Bai J, Curtin M, et al. Defect reduction of selective Ge epitaxy in trenches on Si(001) substrates using aspect ratio trapping. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(5): Art No. 052113
- [19] Suda J D, Kurobe T, Nakamura S, et al. Selective area growth of cubic GaN on 3C-SiC (001) by metalorganic molecular beam epitaxy. *Jpn J Appl Phys*, 2000, 39(11A): Art No. L1081
- [20] Gridchin V O, Reznik R R, Kotlyar K P, et al. Selective-area growth and optical properties of GaN nanowires on patterned SiO₂/Si substrates. *J Phys: Conf Ser*, 2021, 1851(1): Art No. 012006
- [21] Sobanska M, Zytkeiwicz Z R, Klosek K, et al. Selective area formation of GaN nanowires on GaN substrates by the use of amorphous Al₂O₃ nucleation layer. *Nanotechnology*, 2020, 31(18): Art No. 184001
- [22] Oh J, Ryu J, Yang D, et al. Selective area growth of GaN using polycrystalline γ -Alumina as a mask for discrete micro-GaN array. *Cryst Growth Des*, 2022, 22(3): 1770
- [23] Su L X, Yang W, Cai J, et al. Self-powered ultraviolet photodetectors driven by built-in electric field. *Small*, 2017, 13(45): Art No. 1701687
- [24] Su L X, Zhang Q L, Wu T Z, et al. High-performance zero-bias ultraviolet photodetector based on p-GaN/n-ZnO heterojunction. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(7): 072106
- [25] Wu Z P, Jiao L, Wang X L, et al. A self-powered deep-ultraviolet photodetector based on an epitaxial Ga₂O₃/Ga: ZnO heterojunction. *J Mater Chem C*, 2017, 5(34): 8688
- [26] Xu T, Jiang M M, Wan P, et al. High-performance self-powered ultraviolet photodetector in SnO₂ microwire/p-GaN heterojunction using graphene as charge collection medium. *J Mater Sci Technol*, 2023, 138: 183
- [27] Zhang Y, Chen J, Zhu L, et al. Self-powered high-responsivity photodetectors enhanced by the pyro-phototronic effect based on a BaTiO₃/GaN heterojunction. *Nano Lett*, 2021, 21(20): 8808
- [28] Yan M N, Yu N S, Du S Y, et al. A self-powered ZnO nanoarrays/GaN heterojunction ultraviolet photodetectors grown on Si(111) substrate. *Bull Mater Sci*, 2022, 45(3): 105
- [29] Macaluso R, Lullo G, Crupi I, et al. Progress in violet light-emitting diodes based on ZnO/GaN heterojunction. *Electronics*, 2020, 9(6): Art No. 991

- [30] Mishra M, Gundimeda A, Garg T, et al. ZnO/GaN heterojunction based self-powered photodetectors: Influence of interfacial states on UV sensing. *Appl Surf Sci*, 2019, 478: 1081
- [31] Song W Q, Dai X B, He Y K, et al. The gold nanoparticles enhanced ZnO/GaN UV detector. *IEEE J Electron Devices Soc*, 2022, 10: 847
- [32] Zhou H, Gui P B, Yang L, et al. High performance, self-powered ultraviolet photodetector based on a ZnO nanoarrays/GaN structure with a CdS insert layer. *New J Chem*, 2017, 41(12): 4901
- [33] Huang Y, Zhang L C, Wang J B, et al. Enhanced photoresponse of n-ZnO/p-GaN heterojunction ultraviolet photodetector with high-quality CsPbBr₃ films grown by pulse laser deposition. *J Alloys Compd*, 2019, 802: 70
- [34] Peng Y Y, Lu J F, Wang X D, et al. Self-powered high-performance flexible GaN/ZnO heterostructure UV photodetectors with piezophototronic effect enhanced photoresponse. *Nano Energy*, 2022, 94: Art No. 106945
- [35] Feng S Y, Liu Z T, Feng L Z, et al. High-performance self-powered ultraviolet photodetector based on Ga₂O₃/GaN heterostructure for optical imaging. *J Alloys Compd*, 2023, 945: Art No. 169274
- [36] Ding S, Chen K, Xiu X Q, et al. Self-powered solar-blind photodetectors based on vertically aligned GaN@Ga₂O₃ core-shell nanowire arrays. *ACS Appl Nano Mater*, 2022, 5(10): 14470
- [37] Ma Y J, Chen T W, Zhang X D, et al. High-photoresponsivity self-powered α -, ϵ -, and β -Ga₂O₃/p-GaN heterojunction UV photodetectors with an *in situ* GaON layer by MOCVD. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(30): 35194
- [38] Park C H, Zhang S B, Wei S H. Origin of p-type doping difficulty in ZnO: The impurity perspective. *Phys Rev B*, 2002, 66(7): 073202
- [39] Lin Z L, Lin T T, Lin T J, et al. Ultrafast response self-powered UV photodetectors based on GaS/GaN heterojunctions. *Appl Phys Lett*, 2023, 122 (13): Art No. 131101
- [40] Jiang H H, Zhang Y, Li X, et al. GaN MSM structure UV photodetector detector based on nonplanar Si substrate and its performance optimization. *Semicond Sci Technol*, 2022, 37(10): Art No. 105020
- [41] An Y J, Liao J, Wu C, et al. GaN MSM UV detectors with different electrode materials. *IEEE J Electron Devices Soc*, 2021, 9: 1210
- [42] Nallabala N K R, Reddy V R M, Singh V R, et al. Enhanced photoresponse performance in GaN based symmetric type MSM ultraviolet-A and MIS ultraviolet-A to C photodetectors. *Sens Actuat A: Phys*, 2022, 339: Art No. 113502
- [43] Yang G F, Li Y H, Liu Y S, et al. Surface modification of AlGaIn solar-blind ultraviolet MSM photodetectors with octadecanethiol. *IEEE Trans Electron Devices*, 2021, 69(1): 195
- [44] Berger P R. Metal-semiconductor-metal photodetectors//*Symposium on Integrated Optics*, San Jose, 2001
- [45] Aggarwal N, Krishna S, Sharma A, et al. A highly responsive self-driven UV photodetector using GaN nanoflowers. *Adv Electron Mater*, 2017, 3(5): Art No. 1700036
- [46] Freeouf J F, Jackson T N, Laux S E, et al. Effective barrier heights of mixed phase contacts: Size effects. *Appl Phys Lett*, 1982, 40(7): 634
- [47] Teker K, Hocaoglu A, Yildirim M A. Improving detectivity of self-powered GaN ultraviolet photodetector by nickel nanoparticles. *Appl Phys B*, 2021, 127: Art No. 7
- [48] Amendola V, Pilot R, Frascioni M, et al. Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review. *J Phys: Condens Matter*, 2017, 29(20): Art No. 203002
- [49] Chen J N, Albella P, Pirzadeh Z, et al. Plasmonic nickel nanoantennas. *Small*, 2011, 7(16): 2341
- [50] Wang J X, Chu C S, Tian K K, et al. Polarization assisted self-powered GaN-based UV photodetector with high responsivity. *Photon Res*, 2021, 9(5): Art No. 734
- [51] Li J Z, Lin J Y, Jiang H X, et al. Persistent photoconductivity in a two-dimensional electron gas system formed by an AlGaIn/GaN heterostructure. *J appl phys*, 1997, 82(3): 1227
- [52] Hou M M, So H, Suria A J, et al. Suppression of persistent photoconductivity in AlGaIn/GaN ultraviolet photodetectors using *in situ* heating. *IEEE Electron Device Lett*, 2017, 38(1): 56
- [53] Qiu C H, Pankove J I. Deep levels and persistent photoconductivity in GaN thin films. *Appl phys lett*, 1997, 70(15): 1983
- [54] Sun J W, Zhang S, Zhan T, et al. A high responsivity and controllable recovery ultraviolet detector based on a WO₃ gate AlGaIn/GaN heterostructure with an integrated micro-heater. *J Mater Chem C*, 2020, 8(16): 5409
- [55] Tang X, Ji F W, Wang H, et al. Temperature enhanced responsivity and speed in an AlGaIn/GaN metal-heterostructure-metal photodetector. *Appl Phys Lett*, 2021, 119(1): Art No. 013503
- [56] Jiang Z Y, Atalla M R M, You G J, et al. Monolithic integration of nitride light emitting diodes and photodetectors for bi-directional optical communication. *Opt Lett*, 2014, 39(19): 5657
- [57] Lyu Q, Jiang H, Lau K M. Monolithic integration of ultraviolet light emitting diodes and photodetectors on a p-GaN/AlGaIn/GaN/Si platform. *Opt Express*, 2021, 29(6): 8358
- [58] Brubaker M D, Blanchard P T, Schlager J B, et al. On-chip optical interconnects made with gallium nitride nanowires. *Nano Lett*, 2013, 13(2): 374
- [59] Tchernycheva M, Messanvi A, de Luna Bugallo A, et al. Integrated photonic platform based on InGaIn/GaN nanowire emitters and detectors. *Nano Lett*, 2014, 14(6): 3515
- [60] Wang B, Liang S H, Yu J C, et al. Cascade GaN-based micro-photodiodes for photonic integration. *J Phys D: Appl Phys*, 2022, 55(40): Art No. 404004
- [61] Shi J Y, Xu Z Y, Niu W Q, et al. Si-substrate vertical-structure InGaIn/GaN micro-LED-based photodetector for beyond 10 Gbps visible light communication. *Photon Res*, 2022, 10(10): 2394

基金项目：中央高校基金基本科研业务费项目资助（D2230320）。

作者简介：卜俊飞（2002—），男，华南理工大学在校本科生。通信地址：广东省广州市天河区五山路381号华南理工大学。

通信作者：王文樑（1989—），男，博士，教授，研究方向为 GaN 外延材料与探测器，通信地址：广东省广州市天河区五山路381号华南理工大学；E-mail: wenliangwang@scut.edu.cn。