

纳米晶金刚石钝化 GaN 基横向 二极管制备与性能*

任泽阳¹⁾²⁾ 宋松原¹⁾ 张涛^{1)†} 陈鹤元¹⁾ 李姚³⁾ 张金凤¹⁾²⁾
李俊鹏²⁾ 陈军飞¹⁾²⁾ 朱卫东¹⁾ 郝跃¹⁾ 张进成^{1)‡}

1) (西安电子科技大学, 宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学芜湖研究院, 芜湖 241002)

3) (西安理工大学, 西安 710048)

(2025 年 4 月 22 日收到; 2025 年 6 月 30 日收到修改稿)

高输出功率密度下的热积累问题是氮化镓基功率器件面临的关键瓶颈之一. 纳米晶金刚石钝化层策略在 GaN 基高功率器件散热方面发挥着重要的作用. 在硅基 AlGaIn/GaN 异质结材料上制备了厚 420—440 nm、晶粒尺寸 330—380 nm 的纳米晶金刚石薄膜, 制备了纳米晶金刚石钝化的 GaN 基横向肖特基二极管器件, 并对比研究了其与 SiN_x 钝化器件的电学、热学性质. 测试结果显示, 在直流偏置下, 有无纳米晶钝化层的二极管器件正向特性基本一致; 在 -20 V 偏置电压下, 对两种器件施加 2.5 V 脉冲电压后, 纳米晶钝化二极管电流密度仅退化 2.6%, 而 SiN_x 钝化器件电学特性几乎完全退化, 表明纳米晶金刚石钝化二极管具有对电流崩塌现象优异的抑制能力; 在变直流功率条件下对两种器件的热成像显微观测结果显示, 发生热损毁时, SiN_x 钝化器件输出功率密度约 4 W/mm, 而纳米晶钝化器件则约为 7.5 W/mm. 本文是纳米晶金刚石钝化工艺在 GaN 基功率二极管散热应用的首次报道, 充分证明了该策略在 GaN 基功率二极管方面的应用潜力.

关键词: 纳米晶金刚石, GaN, 二极管, 散热

PACS: 81.05.Ea, 81.05.ug, 52.59.Mv, 79.60.Jv

DOI: 10.7498/aps.74.20250523

CSTR: 32037.14.aps.74.20250523

1 引言

GaN 材料具有大禁带宽度、高载流子迁移率和高饱和速度等优点, GaN 高功率器件在雷达、新一代通信模块、无线传能等领域应用前景广阔^[1]. 然而, 受限于 GaN 自身较低的热导率 (200—250 W·m⁻¹·K⁻¹), GaN 功率器件在大功率输出时难

以实现及时有效的散热, 导致器件结温急剧升高. 为了充分发挥高功率 GaN 器件的性能并提高可靠性, 除开发高效散热封装技术外, 还需从实现有源区快速导热方面进行优化^[2,3].

作为自然界热导率最高的材料, 金刚石在解决高功率器件散热问题上具有重要意义^[2,4-7]. 单晶金刚石热导率可高达碳化硅的 5 倍 (>2000 W·m⁻¹·K⁻¹), Rossi 等^[8] 曾在文章中指出, 当晶粒尺寸缩减到纳

* 山东省重点研发计划 (批准号: 2022CXGC020306)、国家自然科学基金 (批准号: 62127812, 62374122, 62134006, 62204193, 62421005)、中国博士后科学基金 (批准号: 2021TQ0256)、中央高校基本科研业务费 (批准号: XJSJ24054, YJSJ24020)、安徽省重点研发项目 (批准号: 2023a05020006) 和合肥综合性国家科学中心资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangtao@xidian.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jchzhang@xidian.edu.cn

米尺度时, 金刚石热导率仍可高达 $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. 目前, AlGaIn/GaN 异质结多在热阻较高的硅或蓝宝石衬底上外延生长, 因此通过键合或集成生长将现有衬底替换为高热导率的金刚石, 有望为器件提供更高效的散热 [3,9-12]. 然而, 由于 GaN 与金刚石存在较大晶格和热失配, 目前实现有效的金刚石-GaN 直接键合极其困难, 大多采用键合层方法, 但键合层会增加界面热阻, 影响散热效果 [13,14], 仍难以达到理想的散热效果; 而化学气相沉积 (CVD) 法生长多晶金刚石需要在高温 (约 $900 \text{ }^\circ\text{C}$) 富氢离子体环境下进行 [15,16], 由于高温 H 等离子体对氮化物表面有很强的刻蚀作用, 经 H 等离子处理后, 氮化物位错和缺陷密度会大幅增加, 外延片电学特性将发生显著退化. 综上所述, 通过键合或异质集成生长来实现 GaN 和金刚石衬底有效的直接结合仍面临十分复杂的挑战. 先进封装技术和热界面材料的优化也被广泛采用, 通过改善器件与散热器之间的热传导路径提升散热效率, 但封装复杂性和界面热阻仍是挑战; 此外, 微通道液冷技术因散热能力强而逐渐应用于高功率器件, 但系统集成复杂且成本较高; 器件结构设计与功率密度优化则从源头减少热积累, 通常与其他散热技术结合应用. 尽管这些方法各有优势, 但普遍存在成本高、工艺复杂或热阻难以进一步降低等瓶颈.

除了采用金刚石散热衬底外, 另一种思路是在器件正面生长纳米晶金刚石 (nano crystalline diamond, NCD) 薄膜, 使其既起到钝化层作用, 又能快速传导近结区域的热量 [17-19], 同时保护器件表面. 由于 NCD 薄膜厚度较薄 (300—500 nm), 且可在较低温度 (约 $750 \text{ }^\circ\text{C}$) 生长, 生长时间低至几分钟, 较传统多晶金刚石衬底生长时氮化物在 H 等离子体中的暴露时间和强度大大降低, 有望保持氮化物性质的稳定 [20]. 该工艺兼容现有器件工艺且成本较低, 因而受到学术界和工业界的广泛关注, 是目前有望实现商业化的 GaN-金刚石异质集成策略.

此前, 针对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 采用 NCD 钝化层改善其散热特性见诸报道 [19,21-23]. 然而, 其他重要功率器件 (如二极管) 大电流、大功率下发热严重的问题亦亟待解决, 而目前尚未见利用 NCD 钝化层的手段改善非 HEMT 功率器件散热性能的报道. 为填补这一空缺, 本文制备了具

有 NCD 钝化层的 AlGaIn/GaN 肖特基横向二极管 (Schottky barrier diode, SBD), 并通过与常规器件的对比, 研究了其电学特性和热学特性. 结果显示, 拥有 NCD 钝化层的横向 SBD 正向输出电流密度与常规器件基本一致, 较好地保持了氮化镓器件原有的特性; 在动态脉冲电学测试中, 相比于无 NCD 钝化层的器件, NCD 钝化的器件显示出对电流崩塌效应抑制的显著优势. 在热学测试方面, NCD 钝化 SBD 不仅显示了一定的绝对结温的下降, 还表现出其具备更好的抑制器件热损毁的能力. 本工作是 NCD 钝化策略在二极管器件方面应用的首次报道, 对于后续充分发挥 NCD 钝化策略在改善高功率 GaN 器件散热方面具有一定的参考意义.

2 实验

本文采用 MOCVD 生长的 6 in 硅基 AlGaIn/GaN 异质结外延片, 其结构如图 1 所示. 外延片被预先切割为 $2 \text{ cm}\times 2 \text{ cm}$ 样品. 由于 SBD 器件阳极肖特基接触, 为避免 NCD 生长的高温富氢环境使得器件肖特基接触退化乃至失效, 本研究先完成 NCD 生长, 后进行肖特基阳极工艺, 主要工艺流程如图 2 所示.

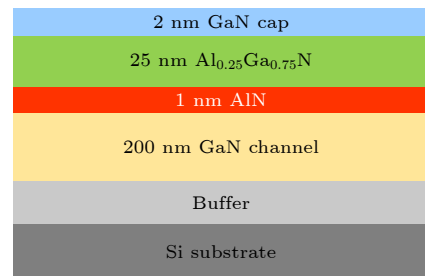


图 1 Si 基 AlGaIn/GaN 异质结外延片结构
Fig. 1. Si-based AlGaIn/GaN heterojunction epitaxial structure.

在实验开始前, 对样品进行有机和无机清洗以去除表面的污染物. 随后采用 Cl_2/BCl_3 基 ICP 干法刻蚀将各器件之间区域刻至氮化镓沟道层以下, 以实现器件间的台面隔离. 随后制备器件的欧姆阴极, 经光刻后采用电子束蒸发 (electron beam evaporation, EBE) 的方法淀积厚度分别为 $20 \text{ nm}/150 \text{ nm}/50 \text{ nm}/100 \text{ nm}$ 的 Ti/Al/Ni/Au 多层金属, 完成金属剥离工艺后, 在 $835 \text{ }^\circ\text{C}$ 纯 N_2 氛围下对样品进行 30 s 退火, 以形成欧姆接触. 接着利用电感

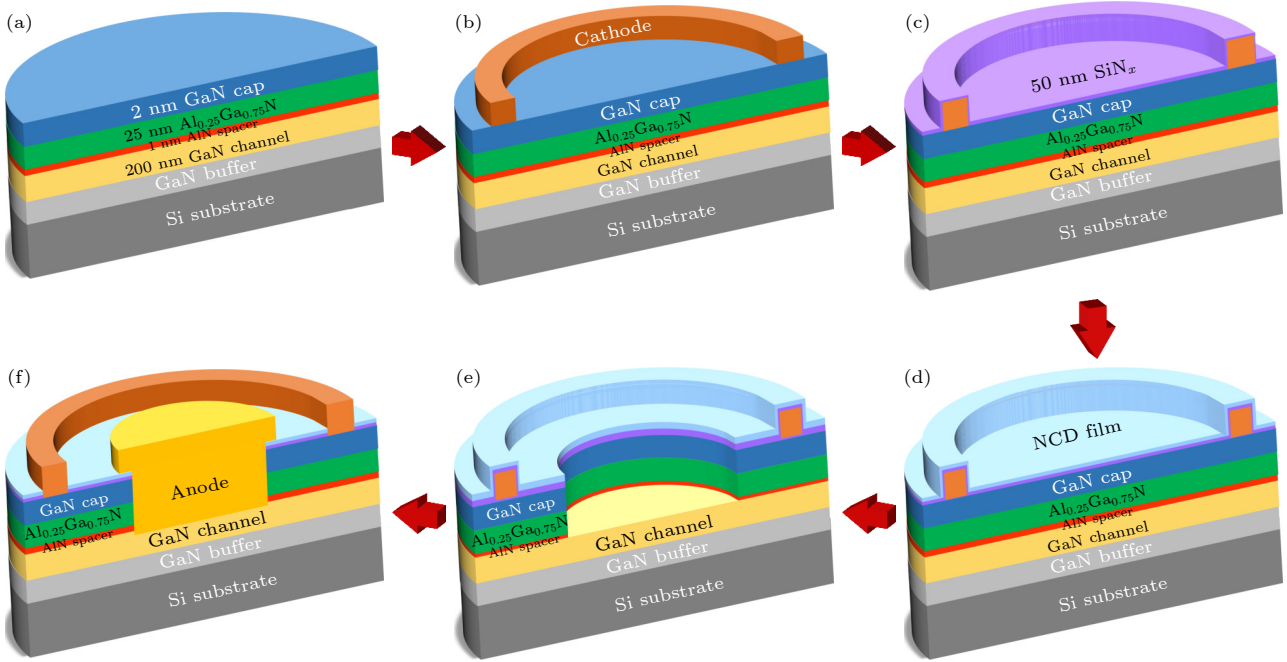


图2 纳米晶金刚石钝化 GaN 基 SBD 主要工艺流程示意图 (a) 材料清洗与台面隔离; (b) 与欧姆阴极制作; (c) SiN_x 隔离层淀积; (d) 纳米晶金刚石薄膜生长; (e) 多步刻蚀暴露阳极区域; (f) 肖特基阳极制作与阴极开孔

Fig. 2. Main fabrication process flow diagram of nano crystalline diamond-passivated GaN-based SBD: (a) Sample cleaning and mesa isolation; (b) ohmic cathode formation; (c) deposition of SiN_x isolation layer; (d) growth of nano crystalline diamond film; (e) multi-step etching to expose the anode region; (f) fabrication of Schottky anode and cathode opening.

耦合等离子体化学气相沉积 (ICP-CVD) 设备在 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 下沉积 50 nm 的 SiN_x 缓冲隔离层, 用于保护二维电子气免受金刚石生长过程中高能氢等离子体的破坏, 同时避免 AlGaN 与 NCD 之间的直接晶格失配. 此外, 该绝缘层在多层结构中还能起到一定的热扩散桥梁作用, 从而有助于改善近结区热传导路径. 在金刚石生长前, 先对样品利用 NCD 晶种悬液进行 1000 r/min 、 10 s 旋涂播种, 待风干后, 采用微波等离子体化学气相沉积 (MPCVD) 设备, 在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 下生长 NCD. 生长过程中, 微波功率保持为 3.2 kW , 氢气、甲烷和氮气流量在标准状况下分别为 300 mL/min , 12 mL/min 和 0.05 mL/min , 腔体压强为 135 mbar ($1\text{ mbar} = 100\text{ Pa}$), 生长时间持续 15 min . 该生长条件在保证膜层连续性的同时, 也有助于控制晶粒尺寸在 $300\text{--}400\text{ nm}$ 内, 从而在热导率提升和应力管理之间取得平衡. 随后利用上述相同方法淀积 100 nm 厚 SiN_x , 作为刻蚀金刚石的硬掩模, 并通过光刻和 ICP 刻蚀在硬掩模上暴露出肖特基阳极区域; 刻蚀硬掩模的过程中, CF_4 流量 40 mL/min (标准状况), ICP/RF 功率为 $300\text{ W}/50\text{ W}$, 持续 120 s . 随后对阳极区域上方进行 90 s 纯氧 ICP 干法刻蚀以去除 NCD, 刻

蚀过程中的氧气流量为 90 mL/min (标准状况), ICP/RF 功率为 $600\text{ W}/300\text{ W}$. 接着对阳极下方 SiN_x 保护层进行 40 s CF_4 基干法刻蚀, 暴露出 AlGaN 表面, 工艺参数同硬掩模刻蚀. 随后进行 Cl_2/BCl_3 基 ICP 刻蚀将阳极区域刻至 GaN 沟道层, 形成阳极凹槽, 并进行后退火以修复刻蚀损伤. 该阳极结构有助于调控势垒宽度和电场分布, 从而改善肖特基注入特性. 最后采用 EBE 淀积厚度分别为 $20\text{ nm}/200\text{ nm}$ 的 Ni/Au 金属, 形成阳极. 为进行后续测试, 还需刻蚀阴极区域以移除表面的 NCD 钝化层.

制备完成的 NCD 钝化二极管 SEM 图像如图 3 所示, 阳极半径为 $100\text{ }\mu\text{m}$, 阴阳极径向间距为 $30\text{ }\mu\text{m}$. 研究中还制备了用于对比的同批次具有 50 nm SiN_x 钝化层的器件, 为方便后续叙述, 记具有 NCD 钝化层器件为器件 A, 而用于对比的 SiN_x 钝化层器件为器件 B.

在器件制备完成后, 利用 KEYSIGHT B1500A 半导体参数测量仪对二极管 A 和器件 B 的静态和动态正向特性进行测试; 通过 Fortic 红外显微热成像仪分别研究了器件 A 和器件 B 在不同输出功率密度下器件的结温变化规律, 并进行了对比分析.

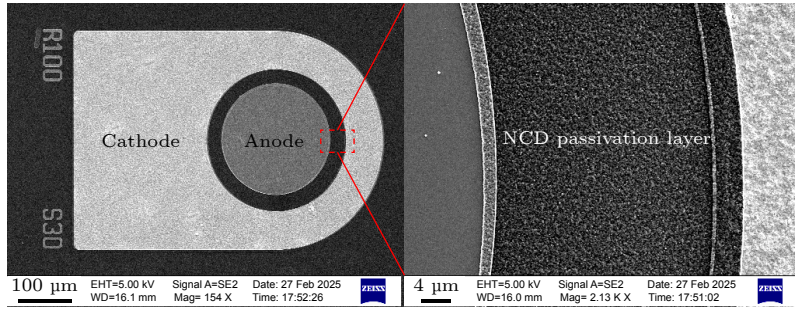


图 3 纳米晶金刚石钝化 AlGaIn/GaN 肖特基二极管 (器件 A) SEM 显微图像

Fig. 3. SEM micrograph of AlGaIn/GaN SBD with nano crystalline diamond passivation layer (device A).

3 结果及讨论

在完成 NCD 生长后利用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对样品进行了观测. 其中, 图 4(a) 为器件阳极边缘经聚焦离子束切割后的截面图像 (截面测量得到了预先的校准), 测得金刚石厚度为 380—450 nm; 图 4(b) 显

示了 NCD 钝化层的表面形貌, 测得金刚石晶粒大小为 330—380 nm.

图 5 为二极管的静态正向导通特性. 器件 B 开启电压为 0.7 V, 器件 A 为 0.725 V. 3 V 时, 器件 B 的输出电流密度为 193 mA/mm, 而器件 A 为 190 mA/mm. 同时, 相比于器件 B, 器件 A 导电电阻增加 0.26 Ω·mm. 分析认为, NCD 钝化器件电

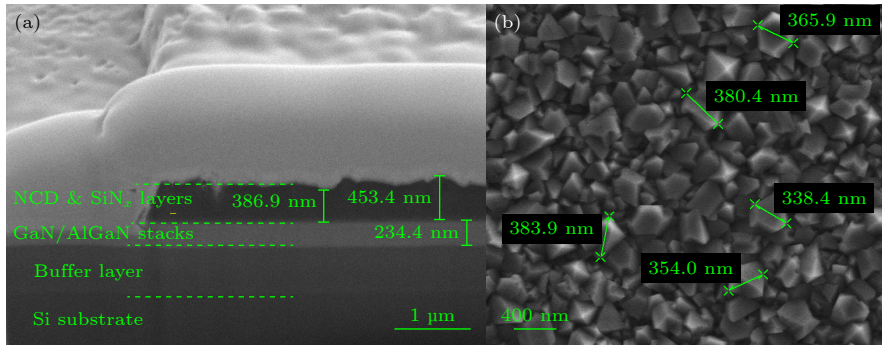


图 4 纳米晶金刚石薄膜 SEM 显微图像 (a) 截面; (b) 表面形貌

Fig. 4. SEM micrograph of nano crystalline diamond film: (a) Cross-section; (b) surface morphology.

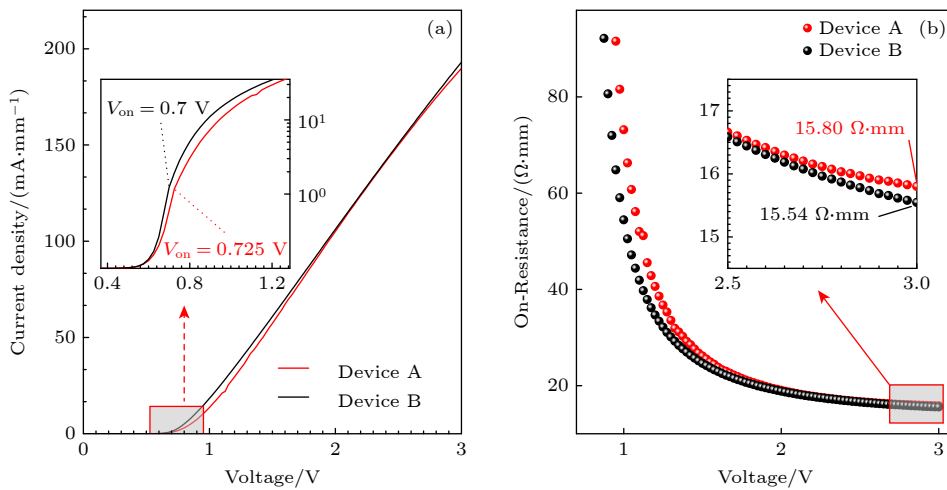


图 5 器件 A 和器件 B 静态正向特性对比 (a) 电流-电压特性; (b) 导电电阻特性

Fig. 5. Comparison of static forward characteristics between device A and device B: (a) I - V characteristics; (b) on-resistance characteristics.

流密度的少量下降是由于利用 ICP 刻蚀去除阳极下方 SiN_x 隔离层时无意引入了少量 F 离子, 造成阳极下方二维电子气密度下降. 而刻蚀和 F 离子注入损伤的共同作用增加了串联电阻, 表现在导通电阻的小幅增加.

反向特性对比如图 6 所示, 器件 B 的反向击穿电压为 -488 V , 而器件 A 仅为 -164 V , 且伴随明显的反向漏电流上升和肖特基特性退化. 分析认为, 本研究中由于在高射频功率下刻蚀阳极表面金刚石, 等离子体中高能氧离子以较大速度轰击样品表面, 底层未被及时刻蚀的金刚石微粒可能在此过程中起到局部遮蔽作用, 形成了“微掩膜”的效应^[17], 导致刻蚀不均匀, 造成较大的表面起伏. 如图 6(b) 和图 6(c) 所示, 刻蚀后氮化物表面出现较多刻蚀坑, 最大起伏达到 20.5 nm , 显示阳极区域表面可能存在多个反向漏电通道. 特别地, 凹槽侧壁区域的刻蚀缺陷会导致肖特基金属局部接触不良, 从而降低肖特基势垒, 表现为器件反向漏电增大与提前击穿. 在未来, 通过优化刻蚀工艺 (如适当降低刻蚀功率或分段刻蚀) 可望减小刻蚀对氮化物表面造成的损伤, 进而改善器件的肖特基反向特性.

对器件 A 和器件 B 进行了动态正向特性测试. 测试中, 在一定反向直流偏置下施加周期为 100 ms 、脉宽为 10 ms 的脉冲电压, 脉冲幅度以 4 mV 步长从 0 V 递增至 2.5 V . 如图 7 所示, 在 -20 V 直流偏置下, 当脉冲电压为 2.5 V 时, 器件 A 的电流密

度退化仅为 2.6% , 动态导通电阻增加 2.74% , 而器件 B 此时电流密度退化高达 99.9% , 表现出严重的电流崩塌. 在更高偏置 (-100 V) 下, 器件 A 的电流密度最大退化为 10% , 动态导通电阻增加 11.3% . 结果表明, 相比于采用 SiN_x 钝化层的器件, 拥有 NCD 钝化层的器件对高频脉冲下 GaN 器件的电流崩塌效应有显著的抑制作用.

分析认为, 电流崩塌效应主要由器件表面或界面处陷阱态对通道电子的俘获造成, 界面态密度越高, 载流子被俘获的数量越大, 释放时间也越长, 导致导通阶段电流衰减和导通电阻升高. 在本研究中, 首先, NCD 的生长过程对 GaN/ SiN_x 界面起到了一定的退火作用, 形成致密稳定的复合钝化结构, 有效地降低界面陷阱态密度; 其次, NCD 较高的热导率提升了器件局部散热效率, 从而抑制热激发陷阱态的形成与激活^[24]. 此外, 较厚的 NCD 层还能缓解器件表面的电场集中, 减少热电子注入界面陷阱的概率. 这些机制共同作用, 减少了载流子在关态期间的俘获行为, 同时缩短陷阱释放时间, 从而有效改善了器件的动态导通性能.

对器件 A, B 的功率-最高温度特性进行测试. 测试时, 阴极接地, 通过施加不同阳极输入电压 ($5\text{--}20\text{ V}$, 每次增加 1 V) 得到器件的输出功率-最高温度关系. 每次测试时, 施加固定偏压, 等待源表和热成像仪示数稳定后分别读取电流值与最高结温, 记录后撤去偏置电压, 待器件充分冷却至室

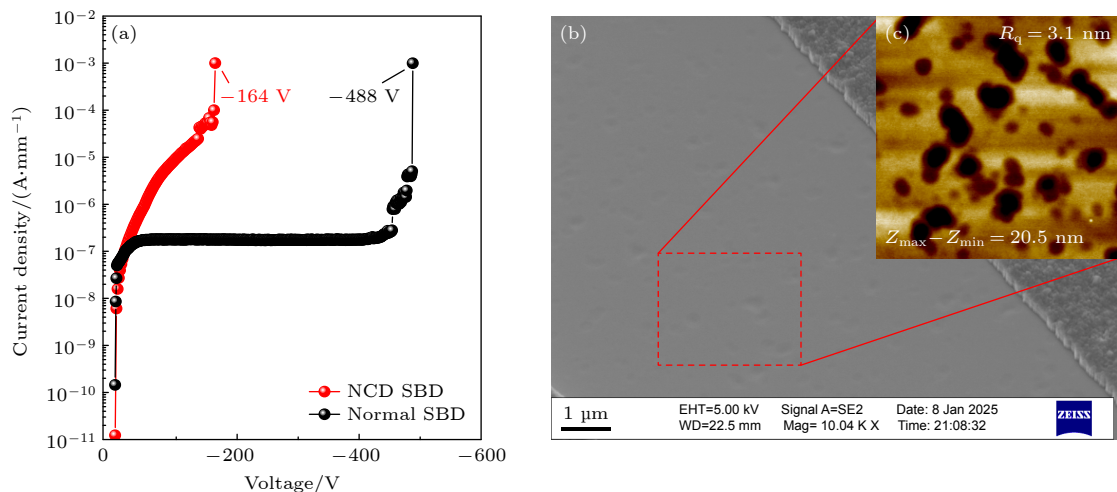


图 6 (a) NCD 钝化 SBD 与常规器件反向特性对比; (b) 刻蚀完成后阳极区域 SEM 显微图像; (c) 刻蚀完成后阳极区域 AFM 显微图像

Fig. 6. (a) Comparison of reverse characteristics between NCD-passivated SBD and conventional device; (b) SEM micrograph of the anode region after etching; (c) AFM micrograph of the anode region after etching.

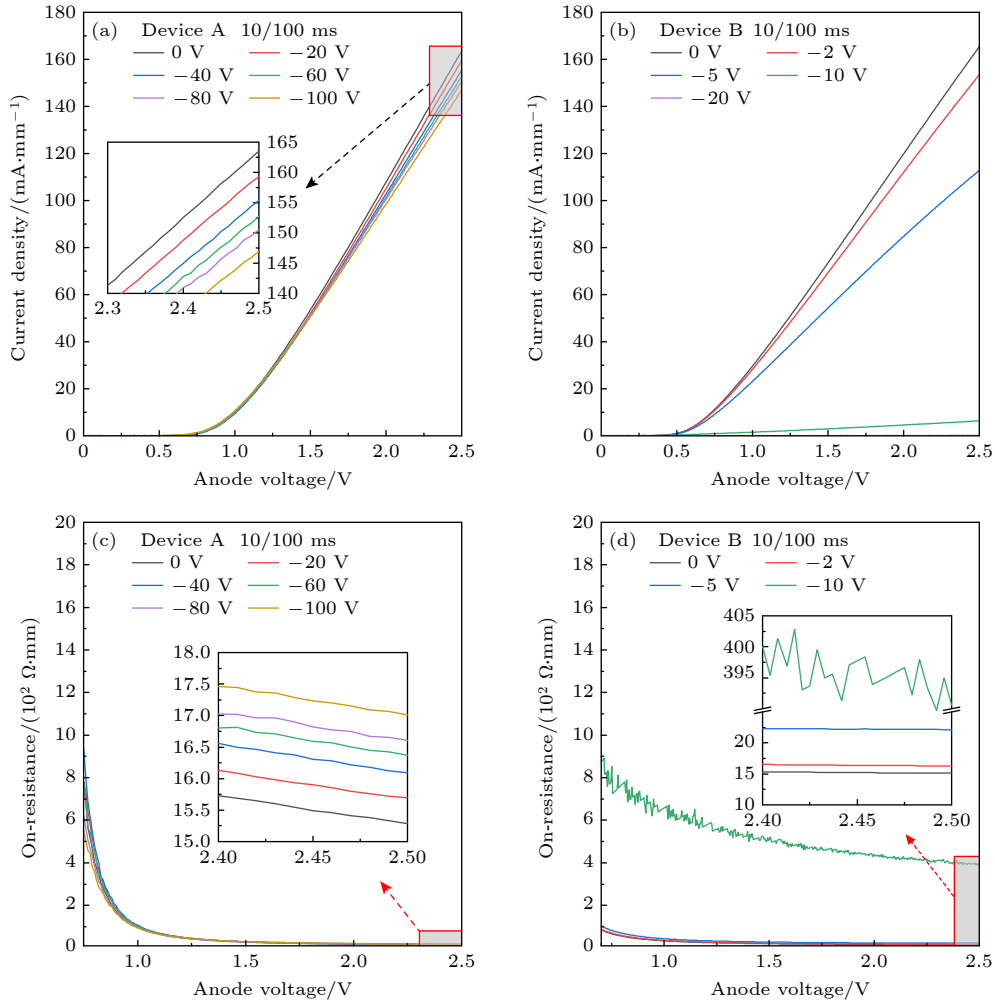


图 7 器件 A 和器件 B 的动态正向特性对比 (a) 器件 A 脉冲电流-电压特性; (b) 器件 B 脉冲电流-电压特性; (c) 器件 A 动态导通电阻特性; (d) 器件 B 动态导通电阻特性

Fig. 7. Comparison of dynamic forward characteristics between device A and B: (a) Pulsed $I-V$ characteristics of device A; (b) pulsed $I-V$ characteristics of device B; (c) dynamic on-resistance characteristics of device A; (d) dynamic on-resistance characteristics of device B.

温后再进行下一次测试. 按照上述方法操作, 得到器件 A, B 的输出功率-最高温度关系如图 8 所示. 结果显示, 当输出功率密度相同时, 器件 A 最高结温约比器件 B 结温低 5—10 °C; 对于器件 A, B 正常工作的测试样本进行线性拟合, 得到器件 A, B 的热阻分别为 $7.37 \text{ K}\cdot\text{mm}\cdot\text{W}^{-1}$ 和 $8.73 \text{ K}\cdot\text{mm}\cdot\text{W}^{-1}$, 表明 NCD 薄膜钝化层具有比单纯 SiN_x 钝化层更快的导热能力. 本研究中仅保留了电极之间的 NCD 钝化层, 后续可尝试通过保留更多的 NCD 进一步提升散热效果. 此外, 器件 B 在输出功率密度超过 $4 \text{ W}/\text{mm}$ 时结温急剧上升, 正常电学特性消失, 表明器件因热量积聚发生损毁, 而器件 A 则在功率密度为 $7.5 \text{ W}/\text{mm}$ 时才发生这一现象. 这意味着 NCD 钝化器件在功率输出能力方面优于 SiN_x 钝化器件.

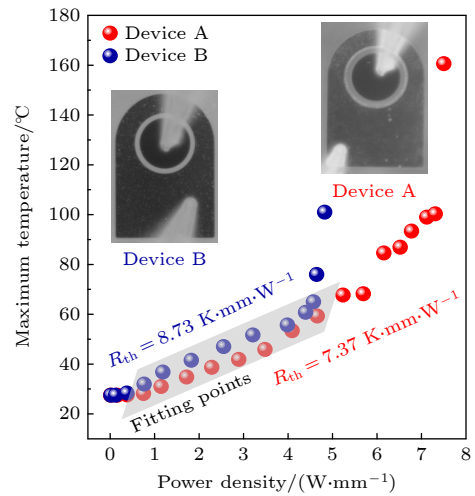


图 8 器件 A, B 的变功率最高结温对比

Fig. 8. Comparison of junction temperature under varying power conditions between devices A and B.

图 9 显示了器件 A, B 在一定功率密度下的热成像温度分布, 二极管正常工作时, 最高温度分布在肖特基阳极边缘. 器件 B 在输出功率密度为 4.58 W/mm 时, 最高工作温度达 $74.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 而器件 A 在输出功率密度为 5.23 W/mm 时, 最高工作温度为 $68.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 器件 A 在输出较大功率的情况下能够保持低于器件 B 的最高工作温度. 从温度分布来看, 器件 B 阴阳极间的温度整体高于器件 A, 且存在多处局部热点, 而器件 A 的电极间温度分布较为均匀. 由此结合图 8 分析认为, 由于环状 NCD 钝化层具有优于 SiN_x 钝化层的散热能力, 使电极间及肖特基阳极边缘的热场分布均匀性得到了改

善, 抑制了局部热点的过早出现, 并在一定程度上延缓了器件热失控效应.

为了进一步说明 NCD 钝化层在器件有源区传热方面的原理, 我们进行了 COMSOL 传热仿真模拟实验. 结合实测结果, 将热源位置定义为肖特基阳极凹槽侧壁, 结果如图 10 所示, 器件 A 的最高工作温度比器件 B 低 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 与实验结果基本符合; 同时, NCD 钝化层下方的温度降低, 这表明 NCD 钝化层能够缓解器件的热积累效应.

最后, 对器件的长期稳定性进行了检测. 测试给定反向应力为 -40 V , 对器件 A 分别施加 30 s 和 600 s 的反向应力, 利用微光显微镜的漏电点位捕

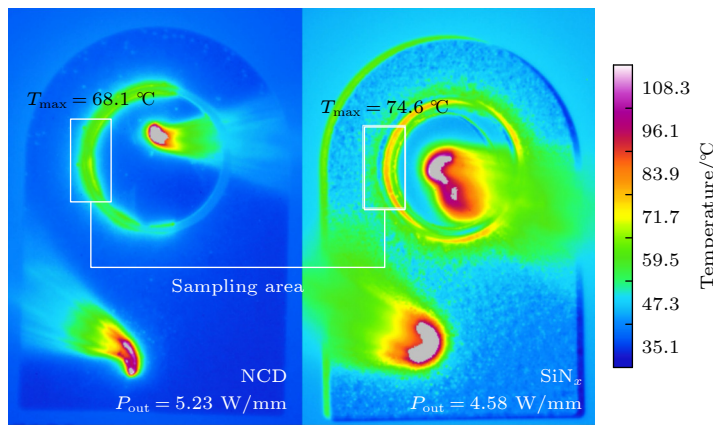


图 9 器件 A, B 的定功率热成像温度分布

Fig. 9. Thermal imaging temperature distribution of devices A and B under certain output power density.

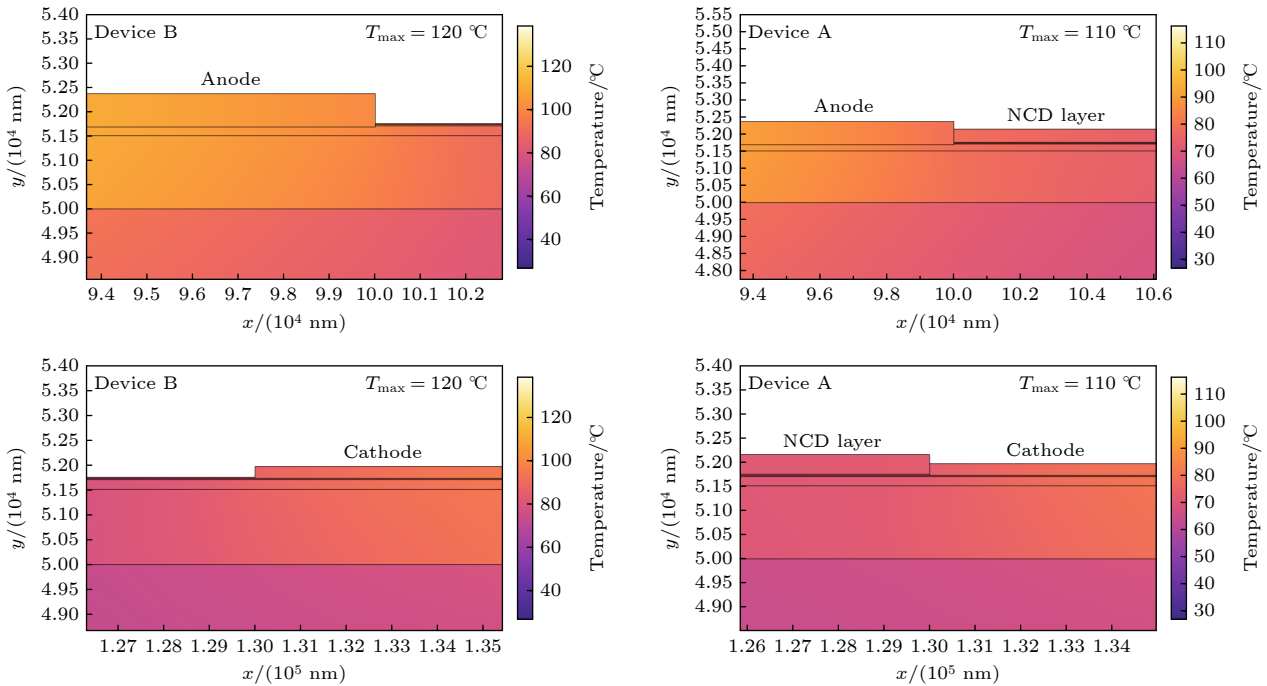


图 10 器件 A, B 传热仿真模拟结果

Fig. 10. Simulation results of heat transfer of devices A and B.

提功能观测器件 A 在较长时间反向应力作用下相对于较短时间反向应力作用下的漏电变化情况. 结果如图 11 所示, 器件 A 在施加 600 s 应力后的漏电点位相较于施加 30 s 应力后并未显著增多, 反映出 NCD 钝化器件具有一定的长期工作稳定性.

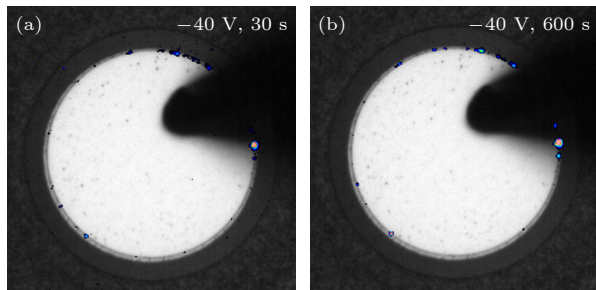


图 11 器件 A 反向应力微光显微镜测试结果

Fig. 11. EMMI microscopy test results of device A after reverse stress applied.

4 结 论

本文制备了具备 NCD 薄膜钝化层的硅基 AlGaIn/GaN 横向 SBD 器件, 并对比研究了其与 SiN_x 薄膜钝化器件的电学与热学特性. 在静态特性方面, NCD 钝化二极管开启电压为 0.725 V, 3 V 直流偏置下输出电流密度为 190 mA/mm, 与常规器件基本一致; 在动态特性方面, NCD 钝化二极管显著优于常规器件, 在 -20 V 直流偏置下, 脉冲电压 2.5 V 时, NCD 钝化器件电流密度退化仅 2.6%, 动态导通电阻增加 2.74%, 而此时 SiN_x 钝化器件电流密度几乎完全退化; 在热学特性方面, 变功率下 NCD 钝化 SBD 最高结温约比常规器件结温低 5—10 °C; 发生热损毁时, 常规器件输出功率密度约 4 W/mm, 而 NCD 钝化器件则约为 7.5 W/mm, 表明 NCD 钝化层不仅降低了器件的绝对结温, 还改善了电极间热场分布的均匀性, 延缓了局部热点导致的器件热失控效应. 本研究显示了 NCD 钝化策略在 GaN 基功率二极管方面的应用潜力, 未来通过优化工艺参数可以进一步提升器件的反向特性以及长期稳定性等性能.

参考文献

- [1] Bader S J, Lee H, Chaudhuri R, Huang S M, Hickman A, Molnar A, Xing H L G, Jena D, Then H W, Chowdhury N, Palacios T 2020 *IEEE Trans. Electron Devices* **67** 4010
- [2] Qin Y, Albano B, Spencer J, Lundh J S, Wang B, Buttay C, Tadjer M, DiMarino C, Zhang Y H 2023 *J. Phys. D: Appl. Phys* **56** 093001
- [3] Minoura Y, Ohki T, Okamoto N, Sato M, Ozaki S, Yamada A, Kotani J 2022 *Appl. Phys. Express* **15** 036501
- [4] Ding Y J, Li J Y, Hao Z L, Wang Q, Zhang H J, Peng Y, Chen M X 2024 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **36** 1005
- [5] Gerrer T, Pomeroy J, Yang F Y, Francis D, Carroll J, Loran B, Witkowski L, Yarborough M, Uren M J, Kuball M 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 1530
- [6] Malakoutian M, Kasperovich A, Rich D, Woo K, Perez C, Soman R, Saraswat D, Kim J K, Noshin M, Chen M, Vaziri S, Bao X Y, Shih C C, Woon W Y, Asheghi M, Goodson K E, Liao S S, Mitra S, Chowdhury S 2023 *Cell Rep. Phys. Sci.* **4** 101686
- [7] Wang Y N, Hu X F, Ge L, Liu Z H, Xu M S, Peng Y, Li B, Yang Y Q, Li S Q, Xie X J, Wang X W, Xu X G, Hu X B 2023 *Crystals* **13** 500
- [8] Rossi S, Alomari M, Zhang Y, Bychikhin S, Pogany D, Weaver J M R, Kohn E 2013 *Diamond Relat. Mater.* **40** 69
- [9] Matsumae T, Kurashima Y, Takagi H, Shirayanagi Y, Hiza S, Nishimura K, Higurashi E 2022 *Scr. Mater.* **215** 114725
- [10] Gao R H, Wang X H, Mu F W, Li X J, Wei C, Zhou W, Shi J A, Tian Y, Xing X J, Li H Y, Huang S, Jiang Q M, Wei K, Liu X Y 2024 *J. Alloys Compd.* **985** 174075
- [11] Tadjer M J, Anderson T J, Ancona M G, Raad P E, Komarov P, Bai T, Gallagher J C, Koehler A D, Goorsky M S, Francis D A, Hobart K D, Kub F J 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 881
- [12] Bai L, Ning J, Zhang J C, Wang D, Wang B Y, Wu H D, Zhao J L, Tao R, Li Z H 2023 *J. Synth. Cryst.* **52** 901 (in Chinese) [白玲, 宁静, 张进成, 王东, 王博宇, 武海迪, 赵江林, 陶然, 李忠辉 2023 *人工晶体学报* **52** 901]
- [13] Gu Y, Zhang Y, Hua B, Ni X, Fan Q, Gu X 2021 *J. Electron. Mater.* **50** 4239
- [14] Lan F F, Liu S S, Fang S S, Wang Y M, Cheng H J 2024 *J. Synth. Cryst.* **53** 913 (in Chinese) [兰飞飞, 刘莎莎, 房诗舒, 王英民, 程红娟 2024 *人工晶体学报* **53** 913]
- [15] Zheng Y T, Li C M, Liu J L, Wei J J, Ye H T 2021 *Funct. Diamond* **1** 63
- [16] Yang H, Ma Y, Dai Y 2021 *Funct. Diamond* **1** 150
- [17] Anderson T J, Hobart K D, Tadjer M J, Koehler A D, Imhoff E A, Hite J K, Feygelson T I, Pate B B, Eddy C R, Kub F J 2016 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **6** Q3036
- [18] Guo H, Li Y, Yu X, Zhou J, Kong Y 2022 *Micromachines (Basel)* **13** 1486
- [19] Zhou X Y, Malakoutian M, Soman R, Bian Z L, Martinez R P, Chowdhury S 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 6650
- [20] Liu Q B, Yu C, Guo J C, Ma M Y, He Z Z, Zhou C J, Gao X D, Yu H, Feng Z H 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 098104 (in Chinese) [刘庆彬, 蔚翠, 郭建超, 马孟宇, 何泽召, 周闯杰, 高学栋, 余浩, 冯志红 2023 *物理学报* **72** 098104]
- [21] Ryou J H, Choi S 2022 *Nat. Electron.* **5** 834
- [22] Tadjer M J, Anderson T J, Hobart K D, Feygelson T I, Caldwell J D, Eddy C R, Kub F J, Butler J E, Pate B, Melngailis J 2012 *IEEE Electron. Device Lett.* **33** 23
- [23] Meyer D J, Koehler A D, Hobart K D, Eddy C R, Feygelson T I, Anderson T J, Roussos J A, Tadjer M J, Downey B P, Katzer D S, Pate B B, Ancona M G 2014 *IEEE Electron. Device Lett.* **35** 1013
- [24] Johnstone D, Doğan S, Leach J, Moon Y T, Fu Y, Hu Y, Morkoç H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4058

GaN-based lateral diode with nanocrystalline diamond passivation layer^{*}

REN Zeyang¹⁾²⁾ SONG Songyuan¹⁾ ZHANG Tao^{1)†} CHEN Heyuan¹⁾
 LI Yao³⁾ ZHANG Jinfeng¹⁾²⁾ LI Junpeng²⁾ CHEN Junfei¹⁾²⁾
 ZHU Weidong¹⁾ HAO Yue¹⁾ ZHANG Jincheng^{1)‡}

1) (*State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Devices and Integrated Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Wuhu Research Institute, Xidian University, Wuhu 241002, China*)

3) (*Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

(Received 22 April 2025; revised manuscript received 30 June 2025)

Abstract

Thermal accumulation under high output power density is one of the key bottlenecks faced by GaN-based power devices. The nanocrystalline diamond (NCD) passivation layer strategy plays a crucial role in improving heat dissipation in high-power GaN devices, while the existing studies focus on GaN-based HEMT. In this study, nanocrystalline diamond films with a thickness of 380–450 nm are grown on Si-based AlGaIn/GaN heterostructure materials using a microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) system. Consequently, lateral Schottky barrier diode devices with NCD passivation are fabricated, and their electrical and thermal properties are investigated. The results show that the DC forward characteristics of the NCD passivated diodes are essentially the same as those of devices without NCD passivation. Moreover, dynamic voltage tests indicate that the NCD passivation layer significantly mitigates current collapse in GaN devices at high frequencies. Under a –20 V DC bias and a pulse voltage of 2.5 V, the current density degradation of NCD passivated devices is only 2.6%, whereas devices without diamond passivation almost completely degrade. Thermal imaging microscopy under varying DC power levels shows that thermal failure occurs at an output power density of approximately 4 W/mm for conventional devices, while NCD passivated devices can reach around 7.5 W/mm. The electrical degradation behaviour of NCD passivated device is also tested under long-time reverse bias. This work demonstrates for the first time the application of nanocrystalline diamond passivation to thermal management of GaN-based power diodes, and clearly demonstrates the potential of this strategy in non-HEMT power device applications.

Keywords: nanocrystalline diamond, GaN, diode, heat dissipation

PACS: 81.05.Ea, 81.05.ug, 52.59.Mv, 79.60.Jv

DOI: [10.7498/aps.74.20250523](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250523)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250523](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250523)

* Project supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province, China (Grant No. 2022CXGC020306), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62127812, 62374122, 62134006, 62204193, 62421005), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2021TQ0256), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant Nos. XJSJ24054, YJSJ24020), the Key Research and Development Program of Anhui Province, China (Grant No. 2023a05020006), and the Hefei Comprehensive National Science Center, China.

† Corresponding author. E-mail: zhangtao@xidian.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jchzhang@xidian.edu.cn



纳米晶金刚石钝化GaN基横向二极管制备与性能

任泽阳 宋松原 张涛 陈鹤元 李姚 张金凤 李俊鹏 陈军飞 朱卫东 郝跃 张进成

GaN-based lateral diode with nanocrystalline diamond passivation layer

REN Zeyang SONG Songyuan ZHANG Tao CHEN Heyuan LI Yao ZHANG Jinfeng LI Junpeng
CHEN Junfei ZHU Weidong HAO Yue ZHANG Jincheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 198101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250523

CSTR: 32037.14.aps.74.20250523

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250523>

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

顶部反射镜对GaN基共振腔发光二极管性能的影响研究

Influence of top mirror on performance of GaN-based resonant cavity light-emitting diode

物理学报. 2022, 71(4): 047801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211720>

一种200 kV的多功能脉冲辐射系统研制

Development of 200 kV multi-function pulsed radiation system

物理学报. 2021, 70(20): 205206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210583>

复合漏电模型建立及阶梯场板GaN肖特基势垒二极管设计

Establishment of composite leakage model and design of GaN Schottky barrier diode with stepped field plate

物理学报. 2022, 71(5): 057301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211917>

多晶金刚石对硅基氮化镓材料的影响

Influence of polycrystalline diamond on silicon-based GaN material

物理学报. 2023, 72(9): 098104 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221942>

AlGaIn/GaN肖特基二极管阳极后退火界面态修复技术

Interface-state suppression of AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes with post-anode-annealing treatment

物理学报. 2023, 72(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230553>

低反向漏电自支撑衬底AlGaIn/GaN肖特基二极管

Investigation of AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes on free-standing GaN substrate with low leakage current

物理学报. 2022, 71(15): 158503 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220161>