

# 低反向漏电和高开关比自支撑准垂直 GaN 肖特基二极管\*

路博文<sup>1)2)</sup> 许晟瑞<sup>1)†</sup> 黄永<sup>2)</sup> 苏华科<sup>1)</sup> 陶鸿昌<sup>1)</sup> 谢磊<sup>1)</sup>  
丁小龙<sup>1)2)</sup> 荣晓燃<sup>1)2)</sup> 刘劭珂<sup>1)</sup> 贾敬宇<sup>1)</sup> 张进成<sup>1)</sup> 郝跃<sup>1)</sup>

1) (西安电子科技大学集成电路学部, 宽禁带半导体国家工程研究中心, 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, 先进微电子器件研究中心, 芜湖 241000)

(2025 年 5 月 8 日收到; 2025 年 6 月 30 日收到修改稿)

GaN 基肖特基势垒二极管 (SBD) 器件具有功率密度高、转换效率高以及开关特性好等优点. GaN 材料在异质外延过程中不可避免地会引入大量的位错, 而位错会导致器件的可靠性问题. 本文报道了一种在自支撑 GaN 衬底上生长并制备的超低位错密度  $N^+/N^-$  GaN 准垂直 SBD 器件. 高分辨 X 射线衍射仪和原子力显微镜表征结果显示, 在自支撑 GaN 衬底上实现了总位错密度为  $1.01 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , 表面均方根粗糙度为 0.149 nm 的高质量外延层的生长. 基于高质量外延层制备的器件在不使用任何终端、场板以及等离子体处理的情况下, 在反向电压为  $-5 \text{ V}$  时表现出  $10^{-5} \text{ A/cm}^2$  的极低泄漏电流密度, 与在蓝宝石衬底上同步制备的对照组器件相比, 反向泄漏电流低 4 个数量级. 实验结果表明, 基于自支撑 GaN 衬底的准垂直 GaN 基 SBD 能够大幅度降低器件的反向漏电, 极大地提升准垂直 SBD 器件的电学性能. 使用微光显微镜对两组器件进行观察, 确定了准垂直 SBD 器件的泄漏电流主要集中在阳极边缘, 并解释了漏电机理. 最后对器件进行了变温测试, 在温度为  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 仍表现出低于  $10^{-3} \text{ A/cm}^2$  的泄漏电流, 证明了自支撑 GaN 衬底上准垂直 SBD 器件具有优良的应用前景.

**关键词:** 自支撑 GaN, 位错密度, 准垂直型肖特基二极管, 电学性能

**PACS:** 42.55.Ye, 61.72.Ff, 81.15.Kk, 85.35.Gv

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250610

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250610

## 1 引言

GaN 材料具有直接带隙、禁带宽度宽 (3.42 eV)、击穿场强高 (3.4 MV/cm) 以及电子迁移率高 ( $2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 等优异特性, 使得 GaN 及其多元合金材料 (InGaN, AlGaN 等) 非常适合于制作功率器件<sup>[1-5]</sup>. GaN 基肖特基势垒二极管 (SBD) 在电力电子、微波探测和航空航天等领域发挥着重要

的作用, 近年来成为研究热点之一<sup>[6,7]</sup>. 但是由于材料缺陷导致的较大反向电流严重限制了其整体性能和可靠性, 阻碍了 GaN 基 SBD 进一步应用于更多场景<sup>[8]</sup>.

近几年国内外报道的在自支撑 GaN 衬底上生长的垂直型 SBD 由于高的晶体质量而表现出优异的性能<sup>[9-11]</sup>. 然而由于垂直型 SBD 需要对 GaN 衬底背面进行处理, 例如衬底去除或通孔技术<sup>[12]</sup>, 工艺比较复杂且成本较高. 而准垂直型 SBD 的结构

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3604400)、陕西省自然科学基金 (批准号: 2023-JC-JQ-56) 中国博士后科学基金 (批准号: GZC20241306)、国家自然科学基金 (批准号: 62404167) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: ZYTS25216, ZYTS25225) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: srxu@xidian.edu.cn

和工艺与目前集成电路主流的平面型工艺平台更加兼容, 无需额外的特殊工艺设备或复杂的工艺调整. 因此, 准垂直型 SBD 器件具有更加广泛的市场应用前景.

为控制成本, 目前主要采用异质外延的方式来制备准垂直 SBD 的外延片, 但是异质外延衬底与 GaN 之间存在严重的晶格失配和热失配, 导致外延生长的 GaN 材料晶体质量差, 制备出的器件性能也随之退化. 为了改善 GaN 准垂直 SBD 外延层的结晶质量, 提升器件性能, 本文以自支撑 GaN 作为衬底材料外延生长并制备准垂直 GaN SBD 器件, 在不使用场板结构和离子注入等终端技术的情况下, 实现了反向泄漏电流密度仅为  $10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, 开关比高达  $7 \times 10^8$  以及开启电压为 0.61 V 的高性能器件. 与采用相同工艺制备的蓝宝石衬底上的 GaN 基 SBD 相比, 泄漏电流密度低 4 个数量级.

## 2 实验

### 2.1 MOCVD 外延 GaN 基 SBD 结构

本实验使用型号为 Prismo PD5 的 MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition) 设备, 在自支撑 GaN 衬底 (厚度为 350  $\mu$ m) 和已经长有 10  $\mu$ m GaN 的蓝宝石衬底 (厚度为 430  $\mu$ m) 上进行准垂直 GaN 基 SBD 器件外延层的外延生长. 具体外延工艺条件为: 首先, 使用 NH<sub>3</sub> 作为 N 源, 使用 H<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 作为载气, 生长厚度为 1.2  $\mu$ m 的非故意掺杂 GaN (U-GaN) 缓冲层; 随后, 使用 TMGa 作为反应 Ga 源, 流量为 630 mL/min(标准状况), 使用 NH<sub>3</sub> 作为反应 N 源, 使用 H<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 作为载气,

并使用流量为 100 mL/min(标准状况) 的硅烷进行 n 型掺杂, 生长厚度为 1.2  $\mu$ m 的重掺 GaN (N<sup>+</sup>-GaN, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>) 传输层; 最后在其他条件不变, 硅烷流量为 0.4 mL/min(标准状况) 的条件下生长 4.4  $\mu$ m 厚的轻掺 GaN (N<sup>-</sup>-GaN, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>) 漂移层. 其中, 在自支撑 GaN 衬底上外延的样品记为样品 a, 在已有 10  $\mu$ m GaN 外延层的蓝宝石衬底上外延的样品记为样品 b.

### 2.2 准垂直 GaN 基 SBD 的制备

完成样品 a 和样品 b 的外延生长后, 开始进行器件的制备, 其工艺步骤如图 1 所示.

1) 晶圆清洗. 主要有三个步骤: 第一步是在丙酮溶液中超声清洗 10 min, 以去除表面存在的有机污染; 第二步是在乙醇溶液中超声清洗 10 min, 洗去表面残留的丙酮溶液; 第三步采用高纯 N<sub>2</sub> 将样品吹干, 完成样品的清洗.

2) 台面刻蚀. 使用介质沉积设备在样品上淀积 SiO<sub>2</sub> 作为掩膜层, 在 SiO<sub>2</sub> 掩膜层上旋涂光刻胶采用光刻工艺将图案转移至光刻胶上, 随后采用反应离子刻蚀 SiO<sub>2</sub> 掩膜层, 去除阳极区域外的 SiO<sub>2</sub>, 并适当过刻确保 SiO<sub>2</sub> 刻蚀干净, 最后置于丙酮和乙醇溶液中采用超声波进行清洗, 洗掉残余的光刻胶.

3) 欧姆金属淀积及退火. 首先采用标准光刻技术形成阴极图案, 随后采用电子束蒸发技术在阴极区域依次淀积 Ti/Al/Ni/Au 四层金属形成欧姆接触, 之后将金属剥离, 并在 N<sub>2</sub> 氛围下进行退火.

4) 阳极金属淀积及退火: 采用标准光刻技术形成阳极图案, 并阳极区域淀积厚度为 30 nm/

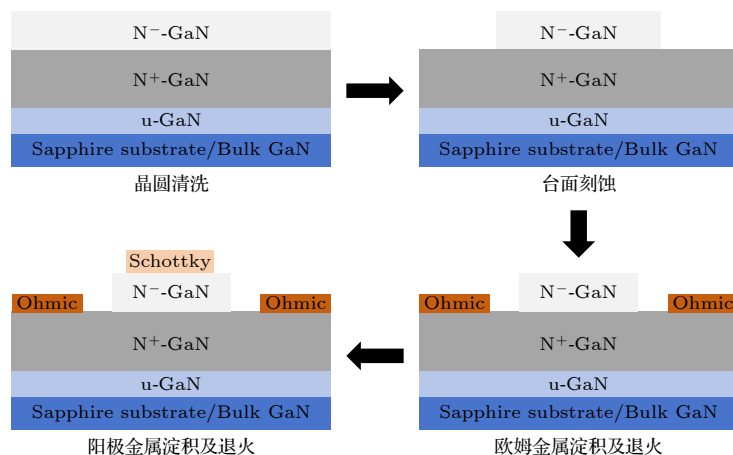


图 1 准垂直 GaN SBD 器件的制备工艺流程图

Fig. 1. Preparation process flow chart of quasi vertical GaN SBD device.

100 nm 的两层金属 Ni/Au 作为肖特基接触, 之后将金属剥离并进行退火.

经过上述 4 个工艺步骤后, 制备的准垂直结构 GaN SBD 器件的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图如图 2 所示, 其中圆形电极为阳极, 黑色部分为阴极.

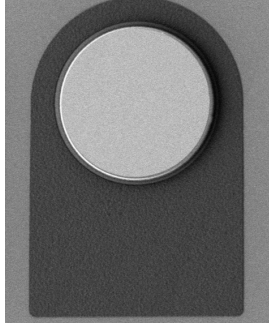


图 2 准垂直结构 GaN SBD 器件的 SEM 图  
Fig. 2. SEM image of GaN SBD device with quasi vertical structure.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 外延层晶体质量表征

为了评估样品的晶体质量, 使用高分辨 X 射线衍射仪 (HRXRD) 对 MOCVD 外延后的样品进行测试, GaN 材料的摇摆曲线如图 3 所示. 总位错密度 (total dislocation density, TD) 为螺位错密度 (screw dislocation density,  $D_{\text{screw}}$ ) 与刃位错密度 (edge dislocation density,  $D_{\text{edge}}$ ) 之和 [13]:

$$\begin{aligned} \text{TD} &= D_{\text{screw}} + D_{\text{edge}} \\ &= \frac{\text{FWHM}_{(002)}^2}{4.36b_{(002)}^2} + \frac{\text{FWHM}_{(102)}^2}{4.36b_{(102)}^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\text{FWHM}_{(002)}$  和  $\text{FWHM}_{(102)}$  分别是 (002) 晶面和 (102) 晶面 XRD 摇摆曲线的半高宽;  $b_{(002)}$  和  $b_{(102)}$  分别是 (002) 晶面和 (102) 晶面的伯格矢量 (Burgers vector), 此处取值分别为 0.5185 nm 和 0.3189 nm [14]. 具体的计算结果在表 1 列出.

表 1 两组样品在 (002) 和 (102) 晶面的半高宽和位错密度

Table 1. FWHM and dislocation density of two groups of samples on the (002) and (102) crystal plane.

编号	(002)/ arcsec	(102)/ arcsec	螺位错密 度/cm <sup>-2</sup>	刃位错密 度/cm <sup>-2</sup>	总位错密 度/cm <sup>-2</sup>
样品a	96	125	$1.85 \times 10^7$	$8.28 \times 10^7$	$1.01 \times 10^8$
样品b	319	717	$2.04 \times 10^8$	$2.73 \times 10^9$	$2.93 \times 10^9$

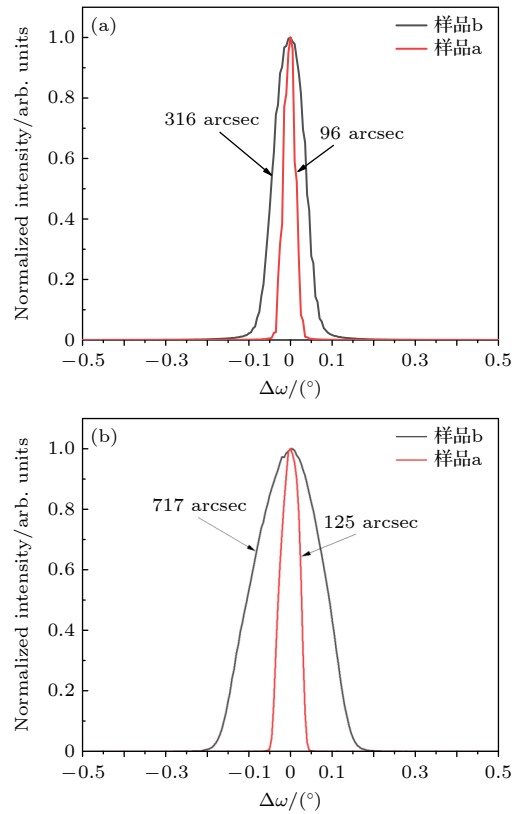


图 3 样品 a 和样品 b 的 (002) 面 (a) 和 (102) 面 (b) 的 XRD 摇摆曲线图

Fig. 3. XRD rocking curves of (002) plane (a) and (102) plane (b) of samples a and b.

从表 1 数据可以看出, 样品 a 的位错密度相较于样品 b 小一个数量级, 这主要是由于样品 a 是以自支撑 GaN 为衬底进行同质外延的, 因而衬底与外延材料间不存在晶格失配的问题; 而样品 b 则是在蓝宝石衬底上异质外延, 晶格失配率高达 16.09%, 因此导致样品 b 具有高密度的位错.

#### 3.2 外延层形貌表征

为了评估外延材料的表面形貌, 对两组样品进行了 AFM 测试, 测试结果呈现在图 4 中. 样品 a

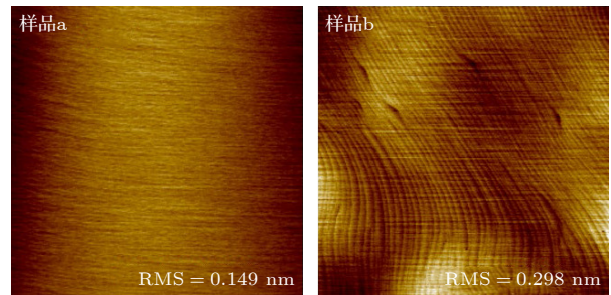


图 4 样品 a 和样品 b 的 AFM 测试图  
Fig. 4. AFM images of sample a and sample b.

和样品 b 的均方根粗糙度 (root mean square, RMS) 分别为 0.149 nm 和 0.298 nm, 与其他报道相比呈现出较低的表面粗糙度 [15-17], 表明两组样品表面均比较光滑, 并且自支撑 GaN 衬底上的外延层更加平整, 平整的表面可以有效避免电场集中效应, 提高器件的可靠性.

### 3.3 拉曼散射测试

为了研究两组样品的应力状态, 在室温下对两组样品进行了拉曼散射测试, 测试系统使用发光波长为 633 nm 的激光器, 测试所得拉曼图谱如图 5 所示. 无应变状态下, GaN 的  $E_2(\text{high})$  峰的频率为  $567.6 \text{ cm}^{-1}$ , 当 GaN 受到压应力时该散射峰右移. 图 5 表明, 样品 a 和 b 的  $E_2(\text{high})$  峰的频率和半高宽分别为  $567.9 \text{ cm}^{-1}$  和  $3.54 \text{ cm}^{-1}$ ,  $569.33 \text{ cm}^{-1}$  和  $3.92 \text{ cm}^{-1}$ , 两组样品的  $E_2(\text{high})$  峰的频率都大于  $567.6 \text{ cm}^{-1}$ , 说明两组样品均处于压应力状态. 对比样品 a, b 发现样品 a 的  $E_2(\text{high})$  峰的半高宽较小, 且峰位更接近  $567.6 \text{ cm}^{-1}$ , 这说明自支撑 GaN 外延层与蓝宝石上外延层相比结晶质量好, 且残余压应力非常小, 和 HRXRD 的结果吻合.

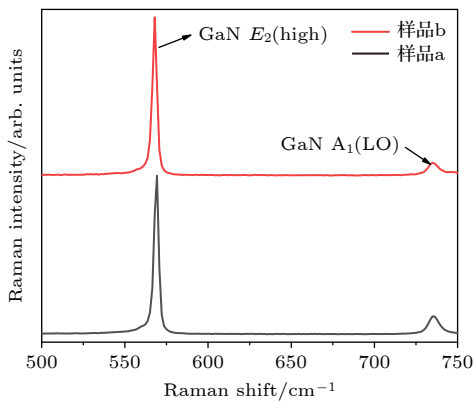


图 5 样品 a 和样品 b 室温下 Raman 图  
Fig. 5. Raman spectra of sample a and sample b at room temperature.

### 3.4 SBD 器件性能测试

首先采用 B1500 半导体参数测量仪对所制备的两组器件在室温下进行正反向测试, 首先从 0—5 V 进行正向扫描, 然后从 0 V 反向扫描到 -5 V, 图 6 为常温半对数坐标下自支撑 GaN 衬底准垂直 GaN SBD 器件 (器件 a) 和蓝宝石衬底准垂直 GaN SBD (器件 b) 正反向扫描  $I-V$  曲线. 本文定义在器件阳极电流密度为  $10 \text{ A/cm}^2$  时 [18], 所对应

的阳极电压偏置为器件开启电压, 器件 a 开启电压为 0.61 V, 而器件 b 开启电压为 0.52 V. 这种差异主要归因于器件 b 的外延层中有更高的位错密度, 而位错在器件中会形成导电通道, 从而使得蓝宝石衬底上的器件在较低正向偏置时就可以达到比较大的电流密度. 当器件反向偏置电压为 -5 V 时, 器件 a 的反向泄漏电流仅为  $10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , 开关比高达  $7 \times 10^8$ , 而以蓝宝石作为衬底的器件 b, 则表现出很大的泄漏电流密度和较低的开关比. 其中, 器件 a 与近些年来国内外制备的基于异质外延衬底的 GaN 基 SBD 器件泄漏电流水平较为接近 [19-26], 且这些基于异质外延衬底的 SBD 器件均采用特殊处理方法, 如阳极表面 F 离子选择性处理或氧等离子体终端来提升器件性能. 本实验所制备的基于自支撑 GaN 衬底的器件未使用任何特殊处理, 仍表现出相近的泄漏电流和较大的开关比, 展现出良好的应用前景.

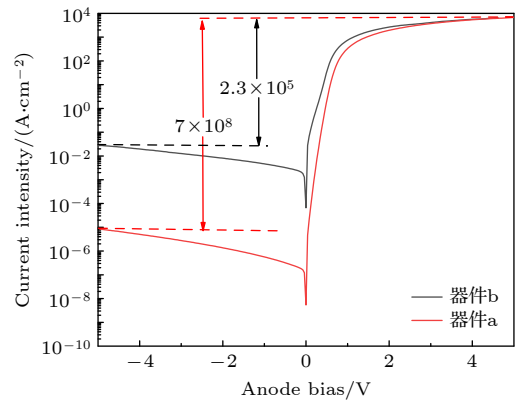


图 6 器件 a 和器件 b 在半对数坐标下的正反向  $I-V$  曲线  
Fig. 6. Forward and reverse  $I-V$  curves of device a and device b in semi-logarithmic coordinates.

使用 B1500 半导体参数测量仪对所制备的两组器件进行了耐压特性测试, 图 7 为器件 a 和器件 b 的反向击穿特性曲线. 器件 a 和器件 b 的击穿电压分别为 99.25 V 和 56.39 V, 二者的显著差距主要归因于高位错密度导致的大泄漏电流使得器件中高电场区域注入更多的载流子, 这些载流子被电场加速后, 可能通过碰撞电离产生额外的电子-空穴对, 大量的电子-空穴对导致雪崩击穿的发生, 从而使得击穿电压降低.

### 3.5 SBD 器件变温可靠性测试

采用 B1505 A 功率半导体器件静态参数测试系统对两组器件进行变温测试. 图 8 为器件 a 和器

件 b 温度相关的电流特性,可以看出随着温度的升高,两组器件的反向泄漏电流密度逐渐增大,且随着温度升高,电子动能增加,电子在更高能量下更易越过势垒进行导电,开启电压逐渐降低.在温度为 100 °C 时,器件 a 的开启电压由 0.61 V 降低到 0.5 V,在反向偏压为 -5 V 时,泄漏电流密度仍可

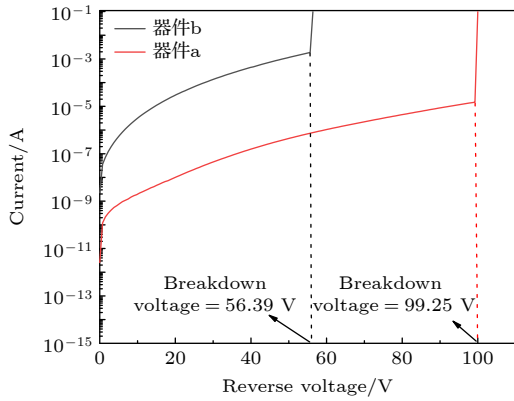


图 7 器件 a 和器件 b 的击穿特性曲线

Fig. 7. Breakdown characteristic curves of device a and device b.

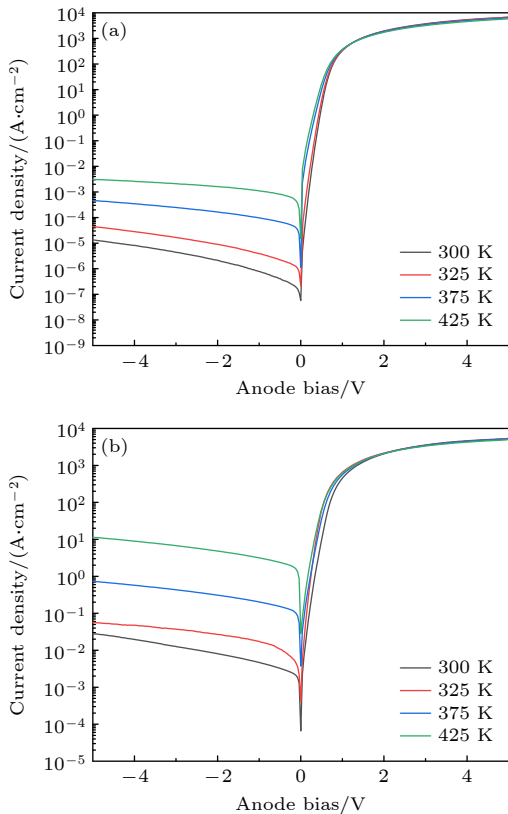


图 8 半对数坐标下器件 a (a) 和器件 b (b) 正反向  $I-V$  特性随温度的变化关系

Fig. 8. Forward and backward  $I-V$  characteristics of device a (a) and device b (b) with temperature in semi-logarithmic coordinates.

以维持在  $10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup> 以下,自支撑 GaN 衬底的准垂直 SBD 器件在高温环境下展示出较为优良的稳定性和应用前景.

### 3.6 SBD 器件泄漏电流机理分析

微光显微镜 (emission microscopy, EMMI) 是一种快捷、精确地定位器件漏电位置的方法,是漏电分析中常见的方法之一.对于半导体器件内部微安、毫安等级别的较小漏电,通过侦测放电过程中放射的少量光子,从而定位到微弱漏电位置.可广泛应用于侦测各种器件缺陷所产生的漏电流,具有非破坏性的优点 [27].

图 9 为 EMMI 在两款器件反向偏置电压为 10 V 时所拍摄到的图像,其中上方图像为基于自支撑 GaN 衬底的 SBD 器件,由于外延层中位错与缺陷较少,在反向偏置电压为 10 V 时,测量出纳安级别的泄漏电流,泄漏电流较小,漏电区域不明显.下方图像为对照组蓝宝石衬底 SBD 器件,可以看到在阳极边缘观察到明显的漏电区域,主要是由于对照组器件的外延层中存在大量的位错,这些位错会在器件中形成泄漏电流通道;而器件的电场在台阶边缘处更加集中,强电场会使得器件中载流子更易发生隧穿等现象,使得对照组器件呈现出非常大的反向泄漏电流.实验和理论结果表明, GaN 中氧杂质沿着螺位错线的浓度较高,引入了大量的施主态陷阱能级,导致螺位错区域肖特基接触处耗尽层宽度比无位错的区域更窄,从而使得缺陷辅助隧穿的可能性增加,使得泄漏电流增大 [28,29].

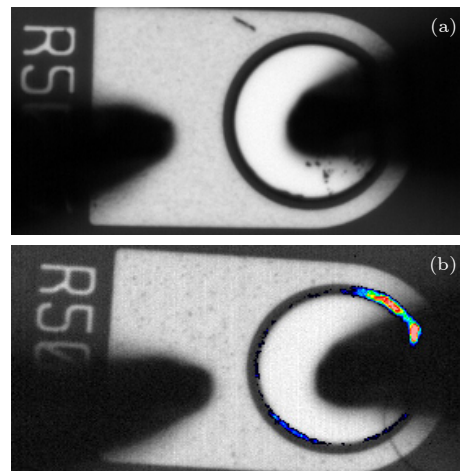


图 9 反向偏压 10 V 下器件 a (a) 和器件 b (b) 的 EMMI 图

Fig. 9. EMMI images of device a (a) and device b (b) under reverse bias of 10 V.

## 4 结 论

本文基于高质量自支撑 GaN 衬底  $N^+/N^-$  GaN 外延片制备了具有低漏电、高开关比特性的准垂直结构 SBD 器件. 得益于自支撑衬底外延材料与常规异质结构外延片相比低位错密度的优势, 器件常温下反向泄漏电流密度仅为  $10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, 开关比高达  $7 \times 10^8$ . 随后对器件进行高温下电流特性的测试, 证明其在高温环境下具有优良的稳定性和应用前景. 最后, 使用 EMMI 对器件漏电区域进行定位, 解释了准垂直 SBD 器件边缘漏电的机理, 证明了基于自支撑 GaN 衬底的准垂直 SBD 器件在未来功率器件的应用具有很大的优势.

## 参考文献

- [1] Liu X, Xu S R, Zhang T, Tao H C, Su H K, Gao Y, Xie L, Wang X H, Zhang J C, Hao Y 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 202103
- [2] Xu S, Xu S R, Wang X H, Lu H, Liu X, Yun B X, Zhang Y C, Zhang T, Zhang J C, Hao Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 196101 (in Chinese) [徐爽, 许晟瑞, 王心颢, 卢灏, 刘旭, 俞博祥, 张雅超, 张涛, 张进成, 郝跃 2023 物理学报 **72** 196101]
- [3] Su H K, Xu S R, Tao H C, Fan X M, Du J J, Peng R S 2021 *IEEE Electron Device Lett.* **10** 1109
- [4] Xu K, Xu S R, Tao H C, Su H K, Gao Y, Yang H, An X, Huang J, Zhang J C, Hao Y 2024 *Acta Electron. Sin.* **52** 3907 (in Chinese) [许航, 许晟瑞, 陶鸿昌, 苏华科, 高原, 杨赫, 安暇, 黄俊, 张进成, 郝跃 2024 电子学报 **52** 3907]
- [5] Su H K, Zhang T, Xu S R, Tao H C, Gao Y, Liu X, Xie L, Xiang P, Cheng K, Hao Y, Zhang J C 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 162102
- [6] Tan G H, Yan F, Chen X L, Luo W K 2018 *Appl. Opt.* **10** 1364
- [7] Brendel M, Helbling M, Knigge A, Brunner F, Weyers M 2015 *Electron. Lett.* **51** 1598
- [8] Zhang Y, Wong H Y, Sun M, Joglekar S, Yu L, Braga N A 2015 *IEDM* **10** 1109
- [9] Jin W Y, Zhang Y M, Xia S Y, Zhu Q Z, Sun Y H, Yi J M, Wang J F, Xu K 2024 *AIP Adv.* **14** 095118
- [10] Xu J Y, Liu X, Xie B, Hao Y L, Wen C P, Wei J 2023 *IEEE Trans. Electron. Device* **32** 41260
- [11] Liao Y Q, Chen T, Wang J, Cai W T, Ando Y, Yang X, Watanabe H, Tanaka A 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 122109
- [12] Yoshizumi Y, Hashimoto S, Tanabe T, Kiyama M 2007 *J. Cryst. Growth* **298** 8758
- [13] Ban K, Yamamoto J, Takeda K, Ide K, Iwaya M, Takeuchi T, Kamiyama S, Akasaki I, Amano H 2011 *Appl. Phys. Express* **4** 052101
- [14] Lu H, Xu S R, Huang Y, Chen X, Xu S, Liu X, Wang X H, Gao Y, Zhang Y C, Duan X L, Zhang J C, H Y 2024 *J. Inorg. Mater.* **202** 30490
- [15] Lu X, Liu C, Jiang H X, Zou X B, Zhang A P, Lau K M 2016 *Appl. Phys. Express* **9** 031001
- [16] Li Q B, Liu G X, Wang S Z, Liu L, Yu J X, Wang G D, Cui P, Zhang S Y, Xu X G, Zhang L 2025 *Surf. Interfaces* **56** 105554
- [17] Liu W S, Wu S H, Balaji G, Huang L C, Chi C K, Hu K J, Kuo H C 2024 *Appl. Phys. A* **130** 801
- [18] Wu P, Zhang T, Zhang J C, Hao Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 158503 (in Chinese) [武鹏, 张涛, 张进成, 郝跃 2022 物理学报 **71** 158503]
- [19] Cao Y, Chu R, Li R, Chen M, Chang R, Hughes B 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 062103
- [20] Chen J B, Bian Z K, Liu Z H, Ning J, Duan X L, Zhao S L, Wang H Y, Tang Q, Wu Y H, Song Y Q, Zhang J C, Hao Y 2019 *Semicond. Sci. Technol.* **34** 115019
- [21] Lambert D J H, Zhu T G, Shelton B S, Wong M M, Chowdhury U, Dupuis R D 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2918
- [22] Witte W, Fahle D, Koch H, Heuken M, Kalisch H, Vescan A 2012 *Semicond. Sci. Technol.* **27** 085015
- [23] Zhang Y H, Sun M, Piedra D, Azize M, Zhang X, Fujishima T 2014 *IEEE Trans. Electron Devices* **10** 1109
- [24] Bian Z K, Zhou H, Xu S R, Zhang T, Dang K, Chen J B, Zhang J C, Hao Y 2019 *Superlattices Microstruct.* **125** 295
- [25] Tokuda H, Watanabe F, Syahiman A, Kuzuhara M, Fujiwara T 2011 *IEEE MTT-S* **10** 1109
- [26] Li L, Kishi A, Liu Q, Itai Y, Fujihara R, Ohno Y 2014 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **6** 168
- [27] Sang L W, Ren B, Sumiya M, Liao M, Koide Y 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 122102
- [28] Kim B, Moon D, Joo K, Oh S, Lee Y K, Park Y, Nanishi Y, Yoon E 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 102101
- [29] Wang J, You H F, Guo H, Xue J J, Yang G F, Chen D J, Liu B, Lu H, Zhang R, Zheng Y D 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 062104

# Quasi vertical GaN Schottky diode on self-supporting substrate with low reverse leakage and high switching ratio\*

LU Bowen<sup>1)2)</sup> XU Shengrui<sup>1)†</sup> HUANG Yong<sup>2)</sup> SU Huake<sup>1)</sup> TAO Hongchang<sup>1)</sup>  
 XIE Lei<sup>1)</sup> DING Xiaolong<sup>1)2)</sup> RONG Xiaoran<sup>1)2)</sup> LIU Shaoke<sup>1)</sup>  
 JIA Jingyu<sup>1)</sup> ZHANG Jincheng<sup>1)</sup> HAO Yue<sup>1)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Devices and Integrated Technology, National Engineering Research Center of Wide Band-gap Semiconductor, Integrated Circuit Department, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Advanced Microelectronics Device Research Center, Xidian Wuhu Research Institute, Wuhu 241000, China*)

( Received 8 May 2025; revised manuscript received 30 June 2025 )

## Abstract

GaN based Schottky barrier diode (SBD) possesses advantages including high power density, high conversion efficiency, and excellent switching characteristics. During heteroepitaxial growth of GaN, a high density of threading dislocations is inevitably introduced, which can degrade device reliability. This paper reports a low dislocation density N<sup>+</sup>/N<sup>-</sup> GaN quasi-vertical SBD fabricated on a freestanding GaN substrate. The characterization results of high-resolution X-ray diffraction and atomic force microscopy demonstrate that the high-quality epitaxial layer with a total dislocation density of  $1.01 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  and a root mean square surface roughness of 0.149 nm is achieved on a freestanding GaN substrate. The device prepared based on a high-quality epitaxial layer exhibits an ultra-low leakage current density of  $10^{-5} \text{ A/cm}^2$  at a reverse voltage of -5 V, without employing any edge termination structures or field plates or plasma treatment. Compared with the devices prepared on sapphire substrates using identical processes, the device prepared in this work reduces the reverse leakage current by four orders of magnitude. The experimental results show that the quasi-vertical GaN based SBD fabricated on a freestanding GaN substrate significantly reduces reverse leakage current and substantially enhances the overall electrical performance of the device. By employing emission-microscope (EMMI), leakage current in quasi-vertical SBD is identified to be primarily localized at the anode edge, and the underlying leakage mechanism is elucidated. Finally, temperature-dependent measurements demonstrate that the device maintains a leakage current below  $10^{-3} \text{ A/cm}^2$  at 100 °C, confirming the potential of quasi-vertical SBD on freestanding GaN substrate for practical applications.

**Keywords:** freestanding GaN, dislocation density, quasi-vertical schottky diode, electrical properties

**PACS:** 42.55.Ye, 61.72.Ff, 81.15.Kk, 85.35.Gv

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250610](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250610)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250610](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250610)

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB3604400), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2023-JC-JQ-56), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. GZC20241306), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62404167), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. ZYTS25216, ZYTS25225).

† Corresponding author. E-mail: [srxu@xidian.edu.cn](mailto:srxu@xidian.edu.cn)

## 低反向漏电和高开关比自支撑准垂直GaN肖特基二极管

路博文 许晟瑞 黄永 苏华科 陶鸿昌 谢磊 丁小龙 荣晓燃 刘劭珂 贾敬宇 张进成 郝跃

## Quasi vertical GaN Schottky diode on self-supporting substrate with low reverse leakage and high switching ratio

LU Bowen XU Shengrui HUANG Yong SU Huake TAO Hongchang XIE Lei DING Xiaolong  
RONG Xiaoran LIU Shaoke JIA Jingyu ZHANG Jincheng HAO Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 194202 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250610

CSTR: 32037.14.aps.74.20250610

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250610>

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

#### 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>

#### 复合漏电模型建立及阶梯场板GaIn肖特基势垒二极管设计

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

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

#### 基于湿法腐蚀凹槽阳极的低漏电高耐压AlGaIn/GaN肖特基二极管

Low leakage current and high breakdown voltage of AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes with wet-etching groove anode

物理学报. 2023, 72(17): 178501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230709>

#### 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>

#### GaIn肖特基二极管的正向电流输运和低频噪声行为

Forward current transport and noise behavior of GaIn Schottky diodes

物理学报. 2021, 70(8): 087201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201467>

#### 势垒可调的氧化镓肖特基二极管

Barrier-tunable gallium oxide Schottky diode

物理学报. 2022, 71(3): 037301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211536>