

# 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\*

武鹏<sup>1)</sup> 朱宏宇<sup>2)</sup> 吴金星<sup>2)</sup> 张涛<sup>1)†</sup> 张进成<sup>1)‡</sup> 郝跃<sup>1)</sup>

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

2) (中国飞行试验研究院, 西安 710089)

(2023 年 5 月 2 日收到; 2023 年 6 月 11 日收到修改稿)

得益于铝镓氮/氮化镓异质结材料较大的禁带宽度、较高的击穿场强以及异质界面存在的高面密度及高迁移率的二维电子气, 基于该异质结材料的器件在高压大功率及微波射频方面具有良好的应用前景, 尤其是随着大尺寸硅基氮化镓材料外延技术的逐渐成熟, 低成本的氮化镓器件在消费电子方面也展现出极大的优势. 为了提高铝镓氮/氮化镓肖特基二极管的整流效率, 通常要求器件具有较小的开启电压、较低的反向漏电流和较高的击穿电压, 采用低功函数金属阳极结构能有效降低器件开启电压, 但较低的阳极势垒高度使器件易受界面缺陷的影响, 导致器件反向漏电流增大. 本文采用一种新型的基于热氧化及氢氧化钾腐蚀的低损伤阳极凹槽制备技术, 解决了常规干法刻蚀引入的表面等离子体损伤难题, 使凹槽表面粗糙度由 0.57 nm 降低至 0.23 nm, 器件阳极反向偏置为 -1 kV 时的漏电流密度由  $1.5 \times 10^{-6}$  A/mm 降低至  $2.6 \times 10^{-7}$  A/mm, 另外, 由于热 KOH 溶液对热氧化后的 AlGaIn 势垒层及 GaN 沟道层具有良好的腐蚀选择比, 因此避免了干法刻蚀腔体中由于等离子体分布不均匀导致的边缘刻蚀尖峰问题, 使器件反向耐压由 -1.28 kV 提升至 -1.73 kV, 器件性能得到极大提升.

**关键词:** 铝镓氮/氮化镓, 肖特基二极管, 低反向漏电, 高击穿电压

**PACS:** 85.30.De, 85.30.Kk, 73.40.Kp

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230709

## 1 引言

随着半导体功率器件及模块的不断发展, 现有的硅 (Si) 快恢复二极管已逐渐难以满足未来高速信息化应用领域需求, 现阶段车载激光雷达通常采用 Si 快恢复二极管作为电路的续流管, 但较长的反向恢复时间阻碍了电路的工作频率, 导致信息采集较慢, 难以满足未来智能驾驶的需求, 而性能较好的碳化硅 (SiC) 肖特基二极管 (SBD) 价格相对

较高, 难以实现高性能激光雷达的普及应用. 基于 Si 衬底的氮化镓 (GaN) SBD 不仅具有相对低廉的成本, 同时还具有可与 SiC SBD 媲美的反向恢复时间, 在未来高速信号的采集及输运方面具有非常好的应用前景. GaN 作为第三代半导体的典型代表, 在实现高耐压、大功率器件方面具有得天独厚的优势<sup>[1-4]</sup>, 尤其是基于铝镓氮/氮化镓 (AlGaIn/GaN) 异质界面强极化效应而产生的高面密度和高迁移率的二维电子气 (2DEG), 为实现高功率密度单片集成电路提供了极佳方案<sup>[5-8]</sup>. 由于缺乏大尺

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62104185)、国家杰出青年科学基金 (批准号: 61925404)、中央高校基本科研业务费 (批准号: QTXZ23076) 和青年人才托举工程 (批准号: 2022QNRC001) 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

寸单晶 GaN 同质衬底, 以及 GaN 同质外延界面存在高陷阱态密度等问题, 现阶段基于 AlGaIn/GaN 异质结的材料通常采用 SiC 和 Si 等异质衬底, 导致外延材料具有较高的穿透位错密度<sup>[9-11]</sup>. 平面结构 AlGaIn/GaN SBD 具有较大的阳极势垒高度及势垒宽度, 器件开启电压通常高达 1.5 V, 另外, 受到阳极金属下方高穿透位错密度的影响, 器件通常具有较大的反向漏电. 为了实现较高的工作效率, GaN SBD 通常需要具有较小的开启电压和较小的反向漏电, 通过采用凹槽阳极结构使阳极金属与沟道处的 2 DEG 直接接触可以有效降低器件开启电压, 并实现对阳极下方穿透位错免疫的效果<sup>[12-16]</sup>.

对于凹槽阳极结构 AlGaIn/GaN SBD 而言, 通过优化器件阳极结构及界面特性, 可以有效提高器件性能. 通过在阳极边缘引入高电子迁移率晶体管 (HEMT) 金属-绝缘层-半导体 (MIS) 栅结构<sup>[17-20]</sup>, 阻断器件反向偏置时阳极边缘的载流子通路, 可以有效降低器件反向漏电, 同时, 得益于凹槽 MIS 栅结构对阳极边缘电场的调控作用, 器件的反向耐压得到了有效的提升. 另外, 采用鳍型 (Fin) 栅结构替代 MIS 栅结构<sup>[21,22]</sup>, 可以进一步实现超低器件反向漏电. 通过采用低功函数金属及金属氮化物阳极结构<sup>[12,13,19]</sup>, 可以有效降低阳极势垒高度, 实现较低的器件开启电压和导通电阻. 对于低功函数金属阳极结构而言, 阳极肖特基势垒特性更易受到界面陷阱态的影响, 因此, 通过采用低损伤 GaN 刻蚀技术降低阳极凹槽界面陷阱态密度, 对实现同时具备低开启电压和低反向漏电的高性能 AlGaIn/GaN SBD 器件具有重要的意义.

本文基于低功函数金属钨阳极技术, 采用湿法腐蚀阳极凹槽制备技术替代常规干法氮化镓刻蚀工艺, 解决了 AlGaIn/GaN SBD 阳极凹槽制备过程中引入的刻蚀损伤较大导致器件反向漏电大的难题, 同时得益于湿法腐蚀技术的自停止优势, 实现了具有明显原子台阶流的刻蚀表面, 与采用干法刻蚀的凹槽阳极器件相比, 凹槽底部表面粗糙度由 0.57 nm 降低为 0.23 nm, 反向击穿电压由 1.28 kV 提升至 1.73 kV, 且正向导通特性无明显退化, 器件整体性能得到大幅度提升.

## 2 器件结构与制备

本文所制备的基于湿法腐蚀凹槽阳极结构的

AlGaIn/GaN SBD 器件的截面结构如图 1 所示, 材料各层结构从上至下依次为 2 nm GaN 帽层, 23 nm Al 组分为 25% 的 AlGaIn 势垒层, 0.8 nm AlN 插入层, 200 nm 非故意掺杂 GaN 沟道层和 6  $\mu\text{m}$  的碳掺杂高阻缓冲层, 衬底采用 1 mm 厚度的 p 型导电 Si 材料. 为了降低外延材料与 Si 衬底之间较大晶格失配的影响, 样品缓冲层采用超晶格结构, 有效抑制了样品穿透位错密度, 提升了 GaN 沟道材料质量, 从材料层面保障了器件实现较高耐压和较低反向漏电的可行性.

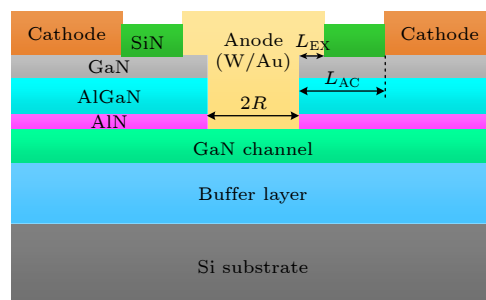


图 1 凹槽阳极结构低功函数阳极金属 AlGaIn/GaN SBD 器件截面图

Fig. 1. Cross-sectional schematic view of AlGaIn/GaN SBD with groove anode and low work-function metal as anode.

为了减少实验过程中对外延材料表面的损伤及污染, 样品经丙酮、异丙醇超声清洗后放置于低压化学气相沉积 (LPCVD) 系统中进行高质量氮化硅 (SiN) 钝化层的生长, 与等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 法相比, 采用 LPCVD 法生长的钝化层具有更好的材料质量, 且能够满足后续 GaN 欧姆接触高温退火的需求, 经测试可知, SiN 钝化层厚度约为 56.3 nm. 台面隔离有助于减少器件之间的串扰, 首先采用反应离子刻蚀 (RIE) 设备以氟基气体为等离子体源对隔离区域的 SiN 材料进行过刻蚀, 裸露出下方 GaN 材料, 然后采用氯气和氯化硼的混合气体在感应耦合等离子体刻蚀 (ICP) 设备中对 GaN 进行刻蚀, 经过台阶仪测试可知, 器件间的总隔离深度约为 210 nm. 阳极区域的 SiN 钝化层采用与台面隔离相同的工艺进行刻蚀移除, 然后在 ICP 设备中以氯化硼气体为等离子体源进行低功率的慢速低损伤刻蚀, 刻蚀速率约为 1.6 nm/min, 刻蚀时间为 3 min, 用以移除阳极区域的 GaN 帽层, 露出下方的 AlGaIn 势垒层, 然后把样品置于 690  $^{\circ}\text{C}$  的管式退火炉中进行高温氧化处理, 氧化时间为 40 min. 由于势垒层热氧化生

成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的吉布斯自由能高于沟道氧化生成  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  的吉布斯自由能,而在该温度下氧气可与  $\text{AlGaIn}$  势垒层发生反应生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,而与  $\text{GaIn}$  材料的反应强度较弱,因此较长的氧化时间有助于保障  $\text{AlGaIn}$  势垒层被充分氧化,且对下方  $\text{GaIn}$  材料界面影响较小.随后把样品置于  $70^\circ\text{C}$  热氢氧化钾 ( $\text{KOH}$ ) 溶液中进行湿法腐蚀,移除被氧化的  $\text{AlGaIn}$  势垒层,裸露出下方的  $\text{GaIn}$  材料.由于热氢氧化钾 ( $\text{KOH}$ ) 溶液仅与热氧化后的势垒层发生反应,而不与下方的  $\text{GaIn}$  材料发生反应,因此实现了自停止的刻蚀效果<sup>[23–25]</sup>.

在器件欧姆接触金属沉积之前,采用与前文相同的 RIE 刻蚀工艺移除欧姆接触区域的  $\text{SiN}$  钝化层,然后在电子束蒸发设备中依次沉积多层  $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$  ( $22/140/55/45\text{ nm}$ ) 金属,并在氮气氛围中高温退火  $35\text{ s}$  形成低阻欧姆接触.器件阳极金属通过采用磁控溅射设备沉积双层  $\text{W}/\text{Au}$  ( $30/150\text{ nm}$ ) 金属,较低的阳极金属功函数是实现器件较小开启电压的关键,然后在氮气氛围下对阳极界面采用  $490^\circ\text{C}$  退火处理,促进阳极金属与凹槽界面的  $\text{GaIn}$  材料成键,从而减小界面悬挂键及陷阱态密度,该阳极后退火处理是低功函数金属阳极  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  SBD 实现低反向漏电的关键步骤.在湿法腐蚀凹槽阳极结构  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  SBD 器件制备的过程中,同时制备基于干法刻蚀的凹槽阳极结构  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  SBD 器件作为对比实验,器件阳极凹槽结构首先采用 RIE 刻蚀工艺移除阳极下方的  $\text{SiN}$  钝化层,然后采用低功率的慢速低损伤刻蚀工艺移除  $\text{AlGaIn}$  势垒层,并在氮气氛围下采用  $450^\circ\text{C}$  退火  $5\text{ min}$  修复刻蚀损伤,除阳极凹槽制备工艺外,其余各步工艺均与湿法腐蚀凹槽阳极结构  $\text{AlGaIn}$  SBD 器件制备方法相同.本文制备的  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  SBD 器件的阳极半径 ( $R$ ) 为  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,阴阳极间距 ( $L_{\text{AC}}$ ) 为  $15\text{ }\mu\text{m}$ ,场板长度 ( $L_{\text{EX}}$ ) 为  $2\text{ }\mu\text{m}$ .

### 3 结果与讨论

采用原子力显微镜 (AFM) 分别对湿法腐蚀阳极凹槽及干法刻蚀阳极凹槽形貌进行测试,结果如图 2(a) 和图 2(b) 所示,其中,内部插图为凹槽刻蚀界面的表面粗糙度,测试范围为  $3\text{ }\mu\text{m} \times 3\text{ }\mu\text{m}$ .得益于热  $\text{KOH}$  溶液对热氧化后的  $\text{AlGaIn}$  势垒层与  $\text{GaIn}$  沟道层之间的选择性腐蚀,采用湿法腐

蚀技术的凹槽深度约为  $82\text{ nm}$ ,即热  $\text{KOH}$  溶液的腐蚀反应自停止于  $\text{GaIn}$  沟道表面,凹槽底部  $\text{GaIn}$  沟道表面出现明显的原子台阶流,表面粗糙度约为  $0.23\text{ nm}$ ,且凹槽底部与刻蚀侧壁之间夹角较为陡直.对于采用干法刻蚀技术的阳极凹槽而言,为了确保阳极金属与沟道中的 2 DEG 直接接触,本文对阳极下方的  $\text{AlGaIn}$  势垒层采用过刻蚀的方法,总刻蚀深度约为  $94\text{ nm}$ ,凹槽底部  $\text{GaIn}$  沟道表面出现颗粒状形貌,表面粗糙度约为  $0.57\text{ nm}$ ,另外,由于干法刻蚀过程中腔体内的等离子体分布不均匀,导致凹槽底部与侧壁之间存在明显的刻蚀尖峰,当器件处于反向偏置时,该刻蚀尖峰会导致阳极边缘电场进一步聚集,从而降低器件的击穿电压.

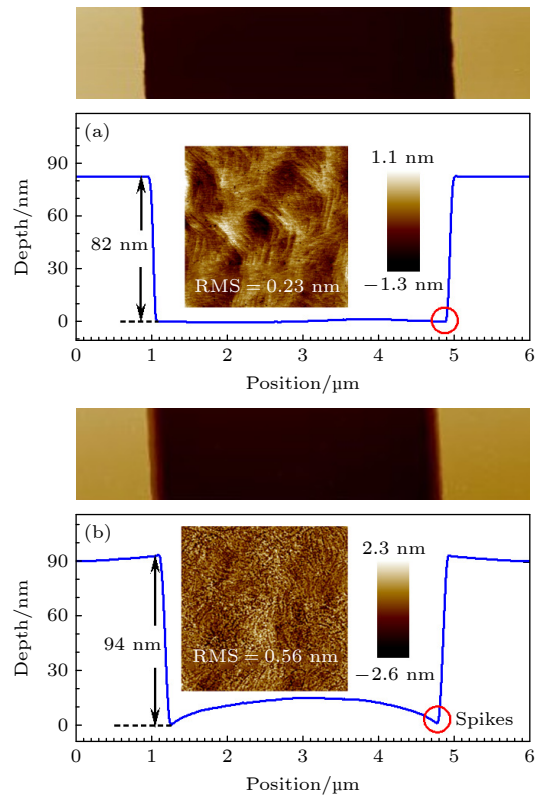


图 2 (a) 湿法腐蚀和 (b) 干法刻蚀阳极凹槽深度及凹槽底部表面形貌

Fig. 2. Depth of groove anode and roughness of the bottom surface fabricated by (a) wet etching and (b) dry etching.

图 3 为采用湿法腐蚀技术制备的器件阳极凹槽边缘透射电子显微镜的测试结果,从图 3 可知,采用 LPCVD 生长的  $\text{SiN}$  钝化层厚度约为  $56.3\text{ nm}$ , $\text{GaIn}$  帽层、 $\text{AlGaIn}$  势垒层及  $\text{AlN}$  插入层的总厚度约为  $25.8\text{ nm}$ ,且采用该湿法腐蚀技术制备的阳极



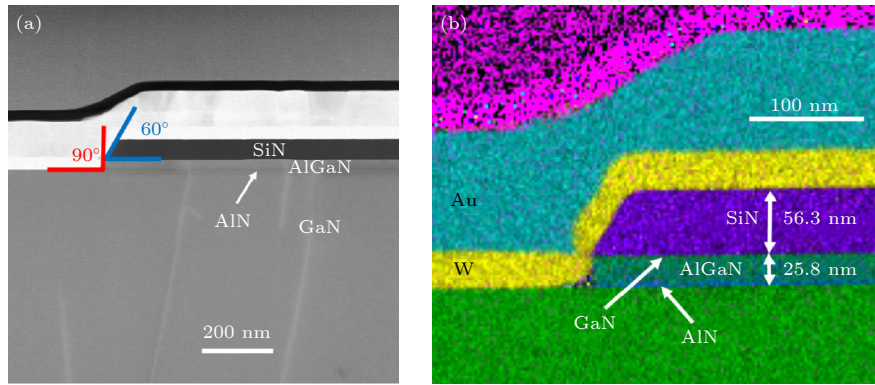


图 3 基于湿法腐蚀凹槽制备技术的 AlGaIn/GaN SBD 阳极凹槽边缘的 (a) 透射电子显微镜切面图和 (b) EDS 元素分析

Fig. 3. (a) Transmission electron microscopy and (b) EDS analysis around the anode edge of the AlGaIn/GaN SBD fabricated by wet-etching technique.

凹槽结构实现了边缘陡峭的刻蚀效果, 势垒层与 GaN 沟道表面夹角近似为  $90^\circ$ , 且 GaN 沟道表面较为平坦, 未出现干法刻蚀过程中由于腔体内等离子体分布不均匀所导致的刻蚀尖峰。

由于本文采用先钝化技术对样品表面进行保护, 因此在器件阳极凹槽制备的过程中需先采用 RIE 设备移除表面的 SiN 钝化层, 为了避免残留的 SiN 钝化层影响后续 ICP 设备对 AlGaIn 势垒层的刻蚀效果, 通常 SiN 钝化层的实际刻蚀时间应长于理论所需的刻蚀时间, 该过程不可避免地会在样品表面引入氟离子, 导致阳极界面势垒高度的变化, 另外, 氟离子在长时间高压应力偏置作用下会产生移动, 引起器件阈值电压的漂移。图 4(a) 和图 4(b) 分别为采用 X 射线光电能谱 (XPS) 设备对湿法腐蚀凹槽表面及干法刻蚀凹槽表面 F 1s 核级谱的测试结果, 从图 4 可知, 采用势垒层热氧化及湿法腐蚀技术所制备的样品表面无明显的 F 1s 峰位, 而采用常规干法刻蚀所制备的凹槽样品表面存在较多的氟离子, 因此, 湿法腐蚀阳极凹槽制备技术可以有效解决 SiN 钝化层刻蚀过程中所引入的氟离子注入问题。

图 5 为采用 Keithley 4200 半导体参数分析仪对器件的正向测试, 器件阳极偏置电压从 0 V 逐渐增至 2.5 V, 步长为 0.01 V。本文定义器件的开启电压为阳极正向电流密度达到  $1 \text{ mA/mm}$  时所对应的阳极偏压, 采用湿法腐蚀及干法刻蚀技术的凹槽阳极结构 AlGaIn/GaN SBD 器件的开启电压分别为 0.43 V 和 0.44 V, 与采用后钝化工艺的器件相比 [12,13], 器件开启电压均正向增大。由于 AlGaIn/GaN 异质结界面处的高浓度 2DEG 位于 GaN 沟

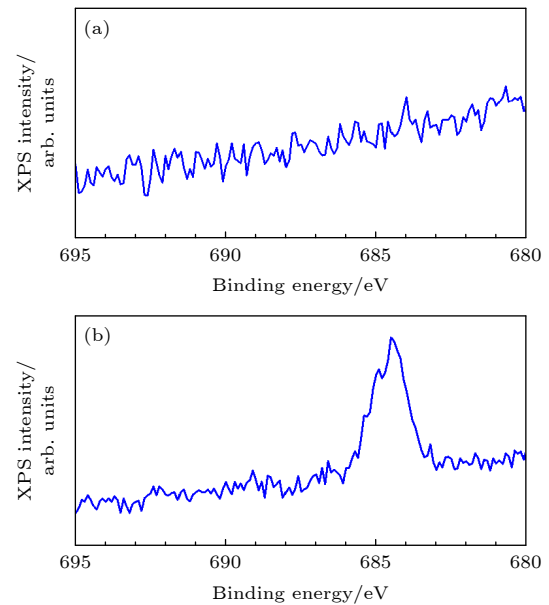


图 4 (a) 湿法腐蚀和 (b) 干法刻蚀阳极凹槽表面 F 1s 核级谱

Fig. 4. F 1s core-level spectra of the bottom surface fabricated by (a) wet etching and (b) dry etching.

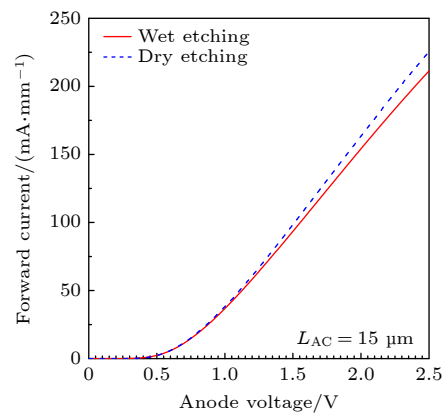


图 5 线性坐标下器件正向导通特性

Fig. 5. Forward  $I$ - $V$  characteristics of the fabricated AlGaIn/GaN SBDs in linear-scale.

道靠近势垒层一侧, 距离异质界面约为几纳米宽度, 同时, 由凹槽侧壁表面和次表面原子重构所引入的空间电荷区宽度也在几纳米范围, 导致基于该湿法腐蚀凹槽制备技术的肖特基势垒宽度宽于基于常规干法刻蚀凹槽制备技术的肖特基势垒宽度, 因此出现基于该湿法腐蚀凹槽阳极 GaN SBD 器件的输出电流相对偏低的情况. 图 6 为采用 Agilent B1505 高压半导体分析仪对器件反向击穿特性的测试结果, 由于湿法腐蚀阳极凹槽制备过程中避免了等离子体的刻蚀损伤, 因此, 当器件的反向偏置电压为  $-1\text{ kV}$  时, 反向漏电仅为  $2.6 \times 10^{-7}\text{ A/mm}$ , 而采用干法刻蚀阳极凹槽技术的 Al-GaN/GaN SBD 器件的反向漏电高达  $1.5 \times 10^{-6}\text{ A/mm}$ , 定义器件反向漏电流为  $10\text{ }\mu\text{A/mm}$  时所对应的阳极偏置电压为器件的击穿电压, 则器件的击穿电压分别为  $-1.73\text{ kV}$  和  $-1.28\text{ kV}$ .

图 7 为基于湿法腐蚀技术的阳极凹槽表面 Ga 3d 核级谱, 由于 Ga-N 键的吉布斯自由能为

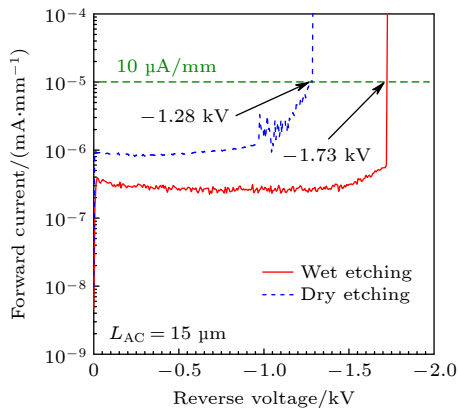


图 6 半对数坐标下器件反向击穿特性

Fig. 6. Reverse  $I$ - $V$  curves of the fabricated AlGaIn/GaN SBDs in semi-log scale.

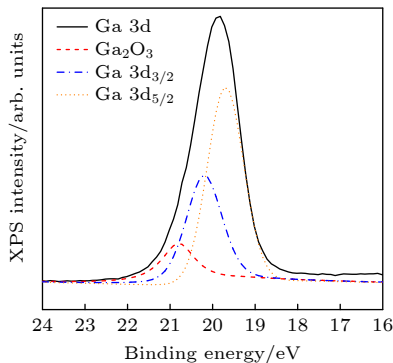


图 7 湿法腐蚀凹槽表面 Ga 3d 核级谱

Fig. 7. Ga 3d core-level spectra of the bottom surface fabricated by wet etching.

$-157\text{ kJ/mol}$ , Ga—O 键的吉布斯自由能为  $-285\text{ kJ/mol}$ , 故 GaN 沟道表面处的 Ga-N 键在高温热氧氧化的过程中会与氧气反应生成 Ga—O 键<sup>[26]</sup>, 导致峰位在测试强度为  $20.7\text{ eV}$  附近出现明显突变, 通过对 Ga 3d 核级谱分峰拟合可知, Ga—O 键与 Ga—N 键的峰值强度比值约为 13.8%. 界面处高质量 GaO 薄膜能够有效抑制器件反向漏电, 进一步提高器件性能<sup>[27]</sup>.

## 4 结 论

本文基于凹槽阳极结构 AlGaIn/GaN SBD 器件, 采用湿法腐蚀凹槽阳极制备技术, 解决了阳极凹槽等离子体干法刻蚀所引入的刻蚀损伤以及刻蚀腔体内等离子体分布不均匀所导致的刻蚀边缘与凹槽底部刻蚀尖峰的问题, 器件反向击穿电压由  $1.28\text{ kV}$  提升至  $1.73\text{ kV}$ , 另外, 得益于低功函数金属阳极较低的肖特基势垒高度, 器件正向开启电压仅为  $0.43\text{ V}$ , 且阳极反向偏置电压为  $1\text{ kV}$  时, 漏电仅为  $2.6 \times 10^{-7}\text{ A/mm}$ . 湿法腐蚀阳极凹槽制备技术, 在实现低开启电压、低反向漏电及高击穿电压 AlGaIn/GaN SBD 器件中展现出了极大的应用潜力, 进一步推动了低损耗、大功率 AlGaIn/GaN SBD 器件的发展.

## 参考文献

- [1] Otake H, Chikamatsu K, Yamaguchi A, Fujishima T, Ohta H 2008 *Appl. Phys. Express* **1** 011105
- [2] Guo Z B, Hitchcock C, Wetzel C, Karlicek R F, Jr, Piao G X, Yano Y, Koseki S, Tabuchi T, Matsumoto K, Bulsara M, Chow T P 2019 *IEEE Electr. Device L.* **40** 1736
- [3] Liu L, Wang J, Wang H Y, Ren N, Guo Q, Sheng K 2022 *IEEE Electr. Device L.* **43** 104
- [4] Rui C, Liang Y N, Han J W, Wang X, Yang H, Chen Q, Yuan R J, Ma Y Q, Shanguan S P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 116102 (in Chinese) [陈睿, 梁亚楠, 韩建伟, 王璇, 杨涵, 陈钱, 袁润杰, 马英起, 上官士鹏 2021 物理学报 **70** 116102]
- [5] Hu J, Stoffels S, Zhao M, Tallarico A N, Rossetto I, Meneghini M, Kang X W, Bakeroot B, Marcon D, Kaczer B, Decoutere S, Groeseneken G 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 371
- [6] Xu W Z, Zhou F, Liu Q, Ren F F, Zhou D, Chen D J, Zhang R, Zheng Y D, Lu H 2021 *IEEE Electron Dev. Lett.* **42** 1743
- [7] Li X D, Geens K, Guo W M, You S Z, Zhao M, Fahle D, Odnoblyudov V, Groeseneken G, Decoutere S 2019 *IEEE Electron Dev. Lett.* **40** 1499
- [8] Nela L, Kampitsis G, Ma J, Matioli E 2020 *IEEE Electron Dev. Lett.* **41** 99
- [9] Zhu M D, Song B, Qi M, Hu Z Y, Nomoto K, Yan X D, Cao Y, Johnson W, Kohn E, Jena D, Xing H L G 2015 *IEEE*

- Electron Dev. Lett.* **36** 375
- [10] Liu C, Khadar R A, Matioli E 2018 *IEEE Electron Dev. Lett.* **39** 71
- [11] Zhang Y H, Sun M, Wong H Y, Lin Y X, Srivastava P, Hatem C, Azize M, Piedra D, Yu L L, Sumitomo T, Braga N D A, Mickevicius R V, Palacios T 2015 *IEEE Trans. Electron Dev.* **62** 2155
- [12] Zhang T, Zhang J C, Zhou H, Wang Y, Chen T S, Zhang K, Zhang Y C, Dang K, Bian Z K, Zhang J F, Xu S R, Duan X L, Ning J, Hao Y 2019 *IEEE Electron Dev. Lett.* **40** 1583
- [13] Zhang T, Wang Y, Zhang Y N, Lv Y G, Ning J, Zhang Y C, Zhou H, Duan X L, Zhang J C, Hao Y 2021 *IEEE Trans. Electron Dev.* **68** 2661
- [14] Wu P, Zhang T, Zhang J C, Hao Y 2022 *Acta Phys. Sin.* 158503 (in Chinese) [武鹏, 张涛, 张进成, 郝跃 2022 物理学报 158503]
- [15] Tsou C W, Wei K P, Lian Y W, Hsu S S H 2016 *IEEE Electron Dev. Lett.* **37** 70
- [16] Xu R, Chen P, Liu M H, Zhou J, Li Y M, Cheng K, Liu B, Chen D J, Xie Z L, Zhang R, Zheng Y D 2021 *IEEE Electron Dev. Lett.* **42** 208
- [17] Zhou Q, Jin Y, Shi Y Y, Mou J Y, Bao X, Chen B W, Zhang B 2015 *IEEE Electron Dev. Lett.* **36** 660
- [18] Gao J N, Wang M J, Yin R Y, Liu S F, Wen C P, Wang J Y, Wu W G, Hao Y L, Jin Y F, Shen B 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 1425
- [19] Hu J, Stoffels S, Lenci S, Bakeroort B, Jaeger B D, Hove M V, Ronchi N, Venegas R, Liang H, Zhao M, Groeseneken G, Decoutere S 2016 *IEEE Trans. Electron Dev.* **63** 997
- [20] Lei J C, Wei J, Tang G F, Zhang Z F, Qian Q K, Zheng Z Y, Hua M Y, Chen K J 2018 *IEEE Electron Dev. Lett.* **39** 260
- [21] Ma J, Matioli E 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 83
- [22] Ma J, Matioli E 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 052101
- [23] Xu Z, Wang J Y, Liu Y, Cai J B, Liu J Q, Wang M J, Yu M, Xie B, Wu W G, Ma X H, Zhang J C 2013 *IEEE Electron Dev. Lett.* **34** 7
- [24] Wang Y, Wang M J, Xie B, Wen C P, Wang J Y, Hao Y L, Wu W G, Chen K J, Shen B 2013 *IEEE Electron Dev. Lett.* **34** 11
- [25] Xu Z, Wang J Y, Liu J Q, Jin C Y, Cai Y, Yang Z C, Wang M J, Yu M, Xie B, Wu W G, Ma X H, Zhang J C, Hao Y 2014 *IEEE Electron Dev. Lett.* **35** 12
- [26] Carin R, Deville J P, Werckmann J 1990 *Sur. Interface Anal.* **16** 65
- [27] Bian Z K, Zhang J C, Zhao S L, Zhang Y C, Duan X L, Chen J B, Ning J, Hao Y 2020 *IEEE Electron Dev. Lett.* **41** 10

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

Wu Peng<sup>1)</sup>   Zhu Hong-Yu<sup>2)</sup>   Wu Jin-Xing<sup>2)</sup>   Zhang Tao<sup>1)†</sup>  
 Zhang Jin-Cheng<sup>1)‡</sup>   Hao Yue<sup>1)</sup>

1) (*National Key Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Devices and Integrated Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China*)

( Received 2 May 2023; revised manuscript received 11 June 2023 )

## Abstract

AlGaIn/GaN heterojunction epitaxies with wide bandgap, high critical electric field as well as high density and high mobility two-dimensional electron gas have shown great potential applications in the next-generation high-power and high-frequency devices. Especially, with the development of Si-based GaN epitaxial technique with big size, GaN devices with low cost also show great advantage in consumer electronics. In order to improve the rectification efficiency of AlGaIn/GaN Schottky barrier diode (SBD), low leakage current and low turn-on voltage are important. The GaN Schottky barrier diode with low work-function metal as anode is found to be very effective to reduce turn-on voltage. However, the low Schottky barrier height makes the Schottky interface sensitive to damage to groove surface, which leads to a high leakage current. In this work, a novel wet-etching technique with thermal oxygen oxidation and KOH corrosion is used to prepare the anode groove, and the surface roughness of groove decreases from 0.57 to 0.23 nm, compared with that of the dry-etching surface of groove. Meanwhile, the leakage current is suppressed from  $1.5 \times 10^{-6}$  to  $2.6 \times 10^{-7}$  A/mm. Benefiting from the great corrosion selectively of hot KOH solution to AlGaIn barrier layer and GaN channel layer after thermal oxygen oxidation, the spikes of the edge of groove region caused by the nonuniform distribution of plasma in the cavity is improved, and the breakdown voltage of the fabricated AlGaIn/GaN SBDs is raised from -1.28 to -1.73 kV.

**Keywords:** AlGaIn/GaN, Schottky barrier diode, low leakage current, high breakdown voltage

**PACS:** 85.30.De, 85.30.Kk, 73.40.Kp

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230709

\* Project supported by the Natural Science Foundation of China (Grant No. 62104185), the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (Grant No. 61925404), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. QTZX23076), and the Young Elite Scientists Sponsorship Program by China Association for Science and Technology (Grant No. 2022QNRC001).

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

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

## 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

武鹏 朱宏宇 吴金星 张涛 张进成 郝跃

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

Wu Peng Zhu Hong-Yu Wu Jin-Xing Zhang Tao Zhang Jin-Cheng Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 178501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230709

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230709>

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>

#### 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>

#### 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>

#### 1000 V p-GaN混合阳极AlGaIn/GaN二极管

p-GaN hybrid anode AlGaIn/GaN diode with 1000 V operation

物理学报. 2018, 67(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181208>

#### 基于晶向优化和Sn合金化技术的一种2.45 G弱能量微波无线输能用Ge基肖特基二极管

A Ge-based Schottky diode for 2.45 G weak energy microwave wireless energy transmission based on crystal orientation optimization and Sn alloying technology

物理学报. 2021, 70(10): 108401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201674>

#### 用于提高微波无线能量传输系统接收端能量转换效率的肖特基二极管

Ge Schottky diode for improving energy conversion efficiency of the receiver of microwave wireless power transfer

物理学报. 2020, 69(10): 108401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191415>