

· 工艺与整管 ·

基于 T 型阳极场板下梯度掺杂的多通道 AlGaIn/GaN 肖特基二极管的研究

李洪亮, 王 策, 黄卡玛

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了降低微波无线能传输系统(MWPT)整流电路模块的能量损耗, 使用 AlGaIn/GaN 异质结肖特基二极管(SBD)可以有效地降低整流损耗。本文设计了一种高性能多通道 SBD 结构, 其具有四个周期性重复 AlGaIn/GaN 的异质结构。为了提高器件的反向特性, 使用 T 型阳极和对不同的 AlGaIn 势垒层采用不同掺杂浓度的方式。这种独特的多通道器件结构正向特性有了显著提升, 导通电阻降低了 74%, 达到了 $2 \Omega \cdot \text{mm}$, 导通电压降低了 57%, 达到了 0.31 V。由于 T 型阳极和独特的 Si 掺杂方式, 该结构的击穿电压达到了 300 V。

关键词: AlGaIn/GaN; 导通电阻; 击穿电压; 掺杂; 肖特基二极管

中图分类号: TN311 文献标识码: A 文章编号: 1002-8935(2023)02-0045-06

doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2023.02.07

Research on Multi-channel AlGaIn/GaN Schottky Diodes Based on Gradient Doping under T-Shape Anode Field Plate

LI Hong-liang, WANG Ce, HUANG Ka-ma

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: It is of great importance to reduce the energy loss of the rectifier circuit module in microwave wireless power transmission system (MWPT). Employing of AlGaIn/GaN heterojunction Schottky diodes (SBDs) can effectively reduce the rectifier loss. A high-performance multi-channel SBD structure with four periodically repeating AlGaIn/GaN heterostructures is designed. In order to improve the reverse characteristics of the device, T-shape anodes are adopted and different doping concentrations are used for different AlGaIn barrier layers. The forward characteristic of this unique multi-channel device structure is significantly improved. Compared with previous reported multi-channel SBDs, the on-resistance (R_{ON}) of the new structure is reduced by 74% to $2 \Omega \cdot \text{mm}$, and the on-voltage (V_{ON}) is reduced by 57% to 0.31 V. The breakdown voltage (V_{BK}) of the structure reaches 300 V due to the T-shape anode and the unique Si doping method.

Keywords: AlGaIn/GaN, On-resistance, Breakdown voltage, Doping, SBD

随着近些年微波无线能传输(MWPT)的发展, 其逐渐被应用在人们日常使用的各种设备中^[1-4]。通常来说, MWPT 是由电磁波发射的功率源、电磁波发射天线、接收天线、整流电路、电路负载或能量存储等模块组成。首先使用功率源将直流(DC)信号转换成射频(RF)信号, 放大 RF 信号后由发射天线辐射到空间中, 然后接收天线在自由空间中收集

到 RF 信号, 通过整流电路将 RF 信号转换成 DC 信号, 最后将转换后的信号给后端的电路负载提供能量或者将能量存储起来^[5-8], 在整个传输系统中, 能量转换效率是 MWPT 系统的关键指标。就目前而言, MWPT 系统转换效率极大程度上受到接收端整流电路的影响, 而最有效的手段就是设计关键器件肖特基二极管(SBD)来提高整体的转换效率。

为了提高整流电路的整流效率,一般采用 GaN 材料来作 SBD。GaN 具有禁带宽度大、电子饱和速度高、击穿电场强和耐高温等优点,所以由其制作的 SBD 具有高温、高压和低导通电阻等优点^[9],因此现在的研究热点主要集中在 GaN 基 AlGaIn/GaN 异质结 SBD 上。这种 SBD 正向导通时在 AlGaIn 和 GaN 接触面处由于费米能级不同而形成势阱,由势阱生成 2DEG 会提高 GaN 中的电子饱和速度,从产生更小的导通电阻(R_{ON}),获得更大的整流效率。想要进一步减小 R_{ON} ,常见的做法是采用多通道 Al-GaN/GaN 或对 AlGaIn 进行高浓度的 Si 掺杂^[10-15],但是这两种做法都会导致 SBD 的反向特性恶化,从而极大地限制其使用的场景。为了降低漏电流和提高击穿电压(V_{BK}),通常采用的做法是加场板平衡 SBD 内部电场^[16-17]。

为了提高 MWPT 中整流模块 RF 信号的整流

效率,首次将 T 型阳极和梯度掺杂的多通道 SBD 结合形成 T 型阳极多通道 SBD(T-MC-SBD)。该结构可以显著降低 R_{ON} ,而 T 型阳极和梯度掺杂的设计可以在不影响正向特性的前提下提升导通电压(V_{ON})。这种 T-MC-SBD 结构的 R_{ON} 只有 $2 \Omega \cdot \text{mm}$, V_{BK} 达到 300 V,可以极大地提升整流模块 RF 信号的整流效率。

1 器件结构

设计了两种结构来说明 T 型阳极多通道 SBD 的特点。T 型阳极是一个垂直场板和一个横向场板组合成的阳极^[16,18],它的垂直场板可以将漏电流引导进入底部高浓度 C 掺杂的缓冲层,从而减低漏电流;而它的横向场板可以最大程度地平衡 SBD 阳极附近的电场。图 1(a)是带有 T 型阳极单通道 SBD(T-SC-SBD),图 1(b)是带有 T 型阳极多通道 SBD(T-MC-SBD)。

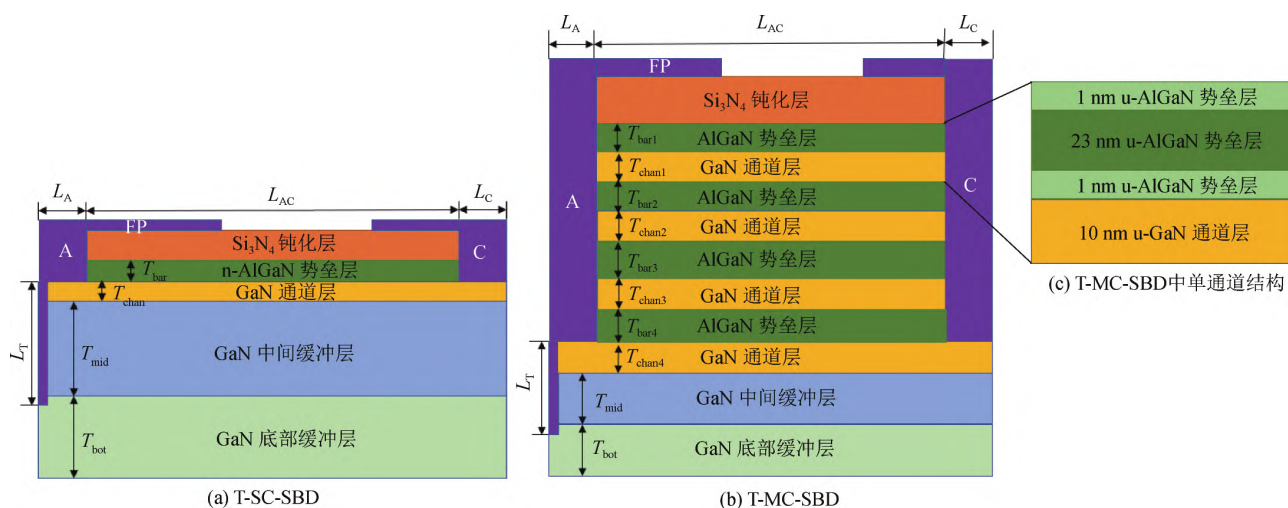


图 1 T-SC-SBD、T-MC-SBD 和 T-MC-SBD 中的单通道结构

在本文中 Si_3N_4 作为钝化层,其厚度设置为 100 nm,主要是用来隔离阴阳电极和为 AlGaIn 势垒层补充电子,所有的 AlGaIn 势垒层的 Al 摩尔量为 0.25。对单通道 SBD 的 AlGaIn 势垒层直接采用 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度的 Si 掺杂^[13,15],而对多通道 SBD 采用梯度掺杂。多通道 SBD 第一层 AlGaIn 采用 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 浓度的 Si 掺杂,第二层和第三层 Al-GaN 则使用 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度的 Si 掺杂,第四层 AlGaIn 使用 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 浓度的 Si 掺杂。值得注意的是,对多通道 SBD 的 AlGaIn 进行 Si 掺杂时,需要在 AlGaIn 层的上下各留 1 nm 不掺杂的 AlGaIn 区域,这样可以提高 SBD 的 V_{BK} 。采用高浓度的 Si 掺杂可以有效地提高 SBD 的 R_{ON} ,但是这种方法也

会导致漏电流和 V_{BK} 严重恶化,所以 SBD 使用 T 型阳极来抑制这种恶化现象。但是对于多通道而言,第一层 AlGaIn/GaN 和最后一层 AlGaIn/GaN 均采用较低的 Si 掺杂可以更好地抑制多通道结构和 Si 带来的反向特性恶化,同时,对中间两层采用较高浓度的 Si 掺杂能显著地提升正向特性。将 GaN 缓冲层分成中间缓冲层和底部缓冲层^[16],对中间缓冲层采用 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的低浓度受体势阱掺杂,而对底部缓冲层采用 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的高浓度受体势阱掺杂^[18-19]。在靠近 2DEG 的中间缓冲层采用低浓度掺杂,可以减小受体势阱对 2DEG 的影响,在远离 2DEG 的底部缓冲层采用高浓度掺杂,可以使缓冲层形成高阻层,从而减小漏电流和提高击穿电压,这

样的结构可以确保在对正向特性几乎没有影响的前提下抑制泄漏电流。

T型阳极的横向场板设置长度为 $0.83\ \mu\text{m}$, 厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$, 阳极横向场板结构可以有效地平衡SBD内部电场, 从而得到更大的击穿电压。T型阳极的垂直场板长度设置为 $0.45\ \mu\text{m}$, 并且连接肖特基接触点和底部缓冲层, 这样可以将漏电流引导到底部缓冲层中, 从而减小漏电流。对于阴极处的场板长度设置为 $0.6\ \mu\text{m}$, 厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$ 。为了减小 V_{ON} , 仿真使用的阳极功函数为 $4.8\ \text{eV}$, 仿真模型有SRH复合模型、极化模型、迁移率模型、通用隧穿模型和碰撞电离模型等, 其他关键参数已经列在表1中。

表1 仿真结构主要参数

参数	参数值	参数	参数值
阳极长度 L_a	$0.67\ \mu\text{m}$	通道层厚度 T_{chan}	$50\ \text{nm}$
阴阳极间距 L_{ac}	$5\ \mu\text{m}$	中间缓冲层厚度 T_{mid}	$0.4\ \mu\text{m}$
阴极长度 L_c	$0.1\ \mu\text{m}$	底部缓冲层厚度 T_{bot}	$0.6\ \mu\text{m}$
T型阳极长度 L_T	$0.45\ \mu\text{m}$	$T_{\text{bar1}} = T_{\text{bar2}} = T_{\text{bar3}} = T_{\text{bar4}}$	$25\ \text{nm}$
势垒层厚度 T_{bar}	$25\ \text{nm}$	$T_{\text{chan1}} = T_{\text{chan2}} = T_{\text{chan3}}$	$10\ \text{nm}$
		T_{chan4}	$50\ \text{nm}$

2 制造工艺

为了制造出本文所提出的结构, 图2给出了制造工艺的流程图。这些工艺步骤的相应描述总结如下:

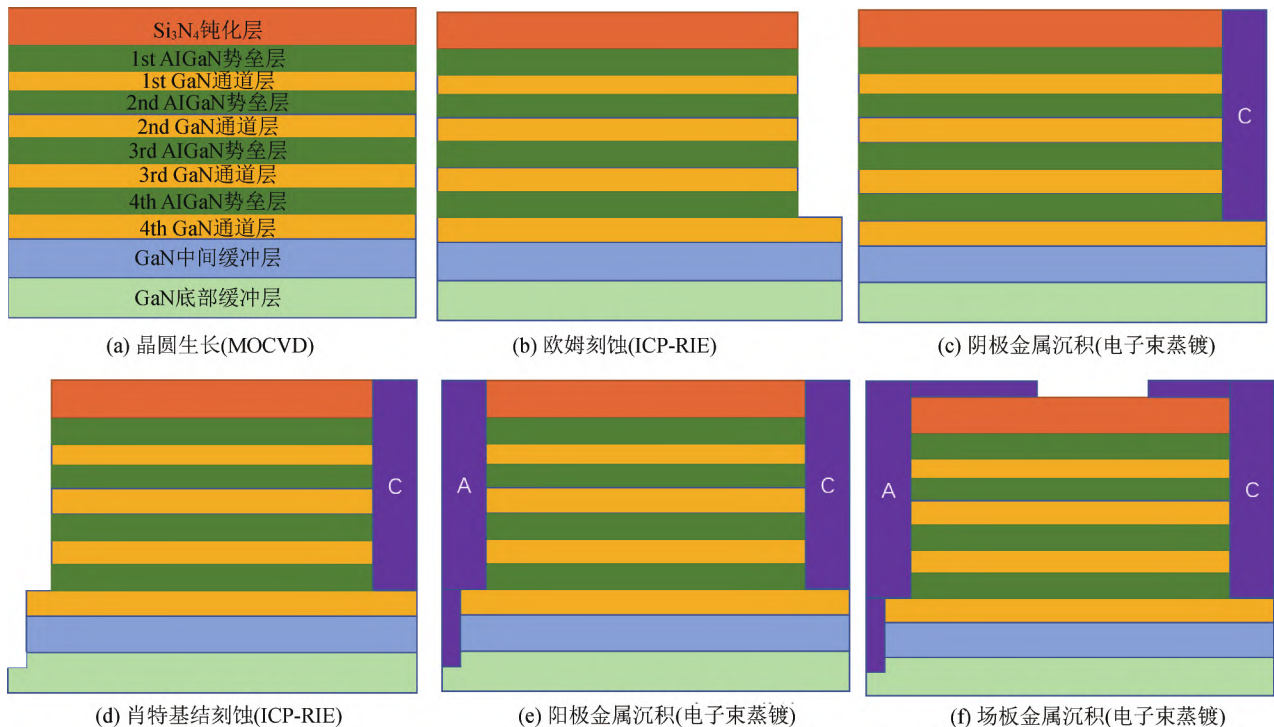


图2 制造工艺步骤示意图

(1) 晶原生长: 使用有机化学气相沉积(MOCVD)生长 GaN 底部缓冲层、GaN 中间缓冲层和四个 AlGaIn/GaN 异质结构, 然后使用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)沉积 Si_3N_4 钝化层。

(2) 欧姆刻蚀: 对阴极使用 BCl_3/Cl_2 气体通过电感耦合等离子体反应离子蚀刻(ICP-RIE)蚀刻 $350\ \text{nm}$ 。

(3) 阴极金属沉积: 使用电子束蒸发在阴极上沉积 Ti/Al/Ni/Au 合金, 然后在 875°C 的 N_2 气体环境中保持 $30\ \text{s}$ 。

(4) 肖特基结刻蚀: 在 BCl_3/Cl_2 气体环境中先使用 ICP-RIE 刻蚀垂直场板深度 $0.45\ \mu\text{m}$, 然后刻蚀

阳极主体。

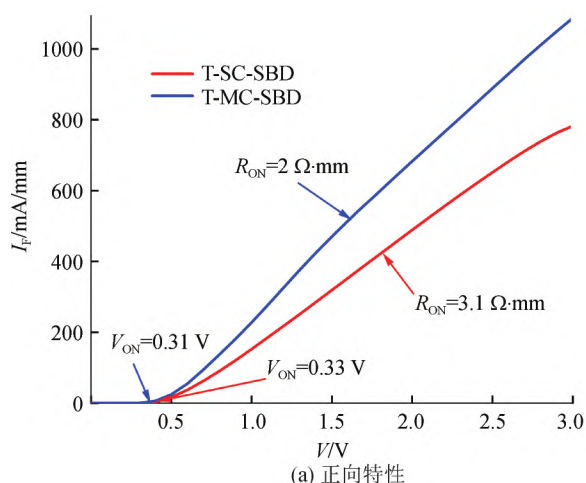
(5) 阳极金属沉积: 使用电子束蒸发在阳极上沉积 Ni/Au 合金。

(6) 场板金属沉积: 使用电子束蒸发分别在阳极和阴极处沉积 Ni/Au 合金。

3 仿真结果

在仿真中当正向电流密度(反向电流密度)达到 $1\ \text{mA}/\text{mm}$ 时, 对应的电压为 V_{ON} 和 V_{BK} ^[16,18]。在图3(a)中表明, 多通道 T-MC-SBD 的 V_{ON} 和 R_{ON} 分别为 $0.31\ \text{V}$ 和 $2\ \Omega \cdot \text{mm}$, 这比先前报道多通道 SBD 的 V_{ON} 和 R_{ON} 分别减少了 57% 和 74% ^[15]。正向特

性显著提升的原因是阳极采用了低功函数 4.8 eV 的 Ni 与 Au 混合金属和更厚的 AlGaIn 势垒层,这导致 2DEG 的密度会更大,所以正向特性会更加好。单通道 T-SC-SBD 的 V_{ON} 和 R_{ON} 为 0.33 V 和 $3.1 \Omega \cdot \text{mm}$,比之前报道单通道 SBD 的 V_{ON} 和 R_{ON} 分别减少了 38% 和 45%^[16]。这主要是由于对 Al-



GaN 势垒层进行了高浓度的 Si 掺杂,导致肖特基势垒降低和 2DEG 密度更大,将 T-MC-SBD 与 T-SC-SBD 的正向特性进行对比,可以得出在相同 T 型阳极结构下,两者基本相差不大, R_{ON} 则是降低了 36%,这种提升是由于多通道结构增加了 2DEG 的路径,使得 R_{ON} 有了显著的提升。

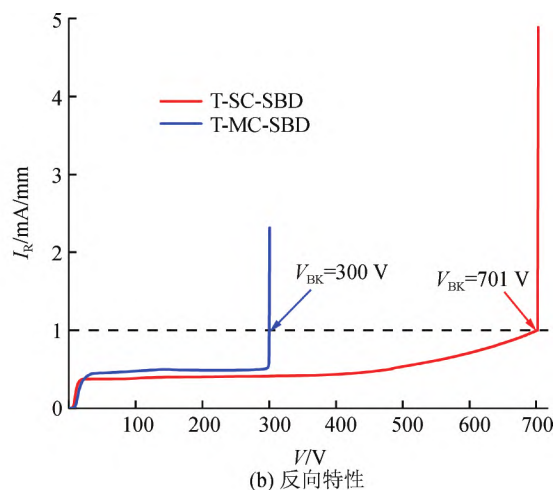


图 3 T-SC-SBD 和 T-MC-SBD 的正向特性曲线和反向特性曲线

由于采用了高浓度的 Si 掺杂和多通道结构,会恶化器件的反向特性,所以使用 T 型阳极和 AlGaIn 层梯度 Si 掺杂来降低漏电流和提高 V_{BK} 。图 3(a)表明,多通道 T-MC-SBD 的击穿电压远小于单通道 T-SC-SBD 的,但是由于对多通道中的 AlGaIn 势垒层进行了梯度掺杂,遏制了 T-MC-SBD 的漏电流提高了 V_{BK} 。

在相同 T 型阳极下,多通道 SBD 比单通道 SBD 有更小的 R_{ON} 和 V_{ON} ,使得 MWPT 的整流电路可以达到更高的效率。因为两者都采用了相同的 T 型阳极,并且进行了浓度相近的掺杂,所以单通道结构的 T-SC-SBD 会有更高的 V_{BK} 。虽然多通道 SBD 的 V_{BK} 小于单通道 SBD,但是对目前 MWPT 系统的 RF 信号整流而言,多通道 SBD 的 V_{BK} 已能够满足大部分整流系统需求。

通过对多通道 SBD 的 AlGaIn 势垒层进行不同浓度的 Si 掺杂,可以有效地降低器件的漏电流和提高 V_{BK} 。从图 4(a)和(b)中可以发现单通道 SBD 的漏电流由于受到 T 型阳极对电场的平衡,导致漏电流在场板处较小。多通道 SBD 漏电流主要在第一层和最后一层的 AlGaIn/GaN,所以减小这两层 AlGaIn/GaN 的掺杂可以较大地提升反向特性。但是第一层 AlGaIn/GaN 对正向特性影响较大,对于这一层的掺杂要慎重考虑。在 Si_3N_4 钝化层和第一层

AlGaIn 之间产生漏电流的原因可能是场板附近的电场太大,同时 AlGaIn 势垒层有 1 nm 的非掺杂层,导致电场聚集在阳极场板下面的非掺杂层处产生了较大的漏电流,所以通过对不同的 AlGaIn 势垒层进行不同掺杂可以有效地减小漏电流,而 T 阳极的垂直场板和横向场板结构也可以很好地平衡电场和减小漏电流。在图 4(c)中电场在 T 型阳极附近受到 T 型阳极的横向场板影响,所以其电场有较为明显的下降,而在阴极附近也同样受到场板的影响,导致电场在阴极附近也会有明显的下降。

在反向击穿时,通过对导带能级的分析可以得出不同通道被击穿的难易程度。从图 5(a)可以发现, T-MC-SBD 的第四层通道的导带能级能量最低,说明第四层通道最容易被击穿,第一层导带能量是最高的,在四层中最难被击穿。从图 5(a)和(b)得到阳极和阴极的导带能级能量差基本上与反向击穿电压一致,这与理论相吻合。

4 结论

本文中 T-MC-SBD 首次将 T 型阳极和梯度掺杂的多通道 SBD 结合,梯度掺杂的多通道可以优化 R_{ON} 而 T 型阳极则可以提高击穿电压,并且 T-MC-SBD 尺寸也小于同类型的 SBD。与以往文章中报道的多通道 SBD 进行对比(表 2),其 R_{ON} 和 V_{ON} 有了较大的提升,但是 V_{BK} 还是受到掺杂的影响,导致

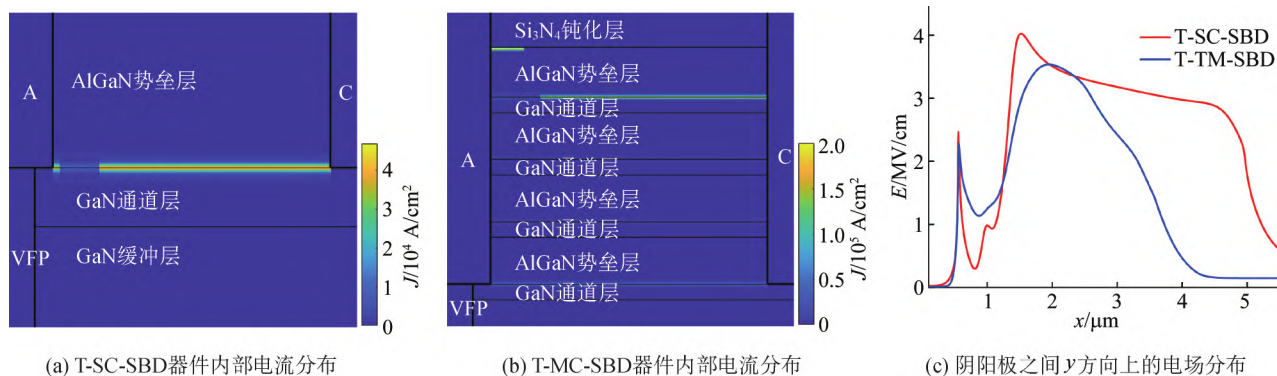


图 4 在击穿发生时, T-SC-SBD、T-MC-SBD 器件内部的电流分布和阳极刻蚀处阳极之间 Y 方向上的电场分布

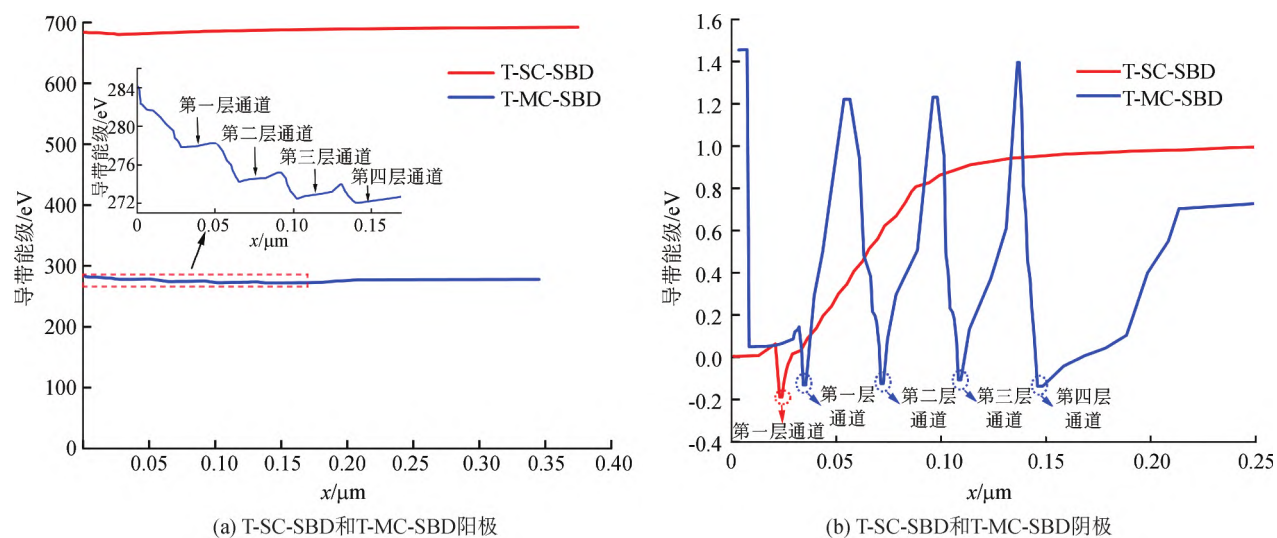


图 5 在电压击穿时 T-SC-SBD、T-MC-SBD 阳极的导带能级和 T-SC-SBD、T-MC-SBD 阴极的导带能级

表 2 主要参数对比

通道	$R_{ON}/\Omega \cdot mm$	V_{ON}/V	V_{BK}/V
未掺杂多通道 SBD ^[15]	7.6	0.67	900
T-SC-SBD	3.1	0.33	701
T-MC-SBD	2	0.31	300

其有了较大的恶化,但是本文中使用的 GaN 缓冲层比较薄,如果加厚 V_{BK} 会有较大的提升。

参 考 文 献

[1] Brown W C. The History of Power Transmission by Radio Waves [J]. IEEE Trans Microw Theory Techn, 1984, 32(9):1230-1242.
 [2] Shinohara N. Power without Wire [J]. IEEE Microw Mag, 2011, 12(7):64-73.
 [3] Shinohara N, Mitani T, Matsumoto H. Study on Ubiquitous Power Source with Microwave Power Transmission[J]. Proc Int Union Radio Sci (URSI) Gen Assembly, 2005;01145.

[4] Shinohara N, Miyata Y, Mitani T, et al. New Application of Microwave Power Transmission for Wireless Power Distribution System in Buildings[C]. Proc Microwave Conf, China; Macau, 2008;1-4.
 [5] Huang Kaibin, Vincent K N, Lau Enabling. Wireless Power Transfer in Cellular Networks: Architecture, Modeling and Deployment [J]. CoRR abs/1207.5640. (2012).
 [6] Youn D G, Park Y H, Kim K H, et al. A Study on the Fundamental Transmission Experiment for Wireless Power Transmission System[C]. Proc IEEE Region 10 Conf (TENCON), Korea; Cheju Island, 1999: 1419-1422.
 [7] Song J, Zhao X, Wu X, et al. High Rectification Efficiency Direct Bandgap $Ge_{1-x}Sn_x$ Schottky Diode for Microwave Wireless Power Transfer[J]. Appl Phys A, 2019, 125:1-10.
 [8] Li L, Kishi A, Liu Q, et al. GaN Schottky Barrier Diode with TiN Electrode for Microwave Rectification [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2014, 2

(6):168-173.

- [9] Sanz-Robinson J, Rieutort-Louis W, Hu Y, *et al.* Hybrid Amorphous/Nanocrystalline Silicon Schottky Diodes for High Frequency Rectification[J]. IEEE Electron Device Lett, 2014,35(4):425-427.
- [10] Heikman S, Keller S, Green D S, *et al.* High Conductivity Modulation Doped AlGaIn/GaN Multiple Channel Heterostructures [J]. Journal of Applied Physics, 2003,94(8):5321-5325.
- [11] Yang C, Luo X, Deng S, *et al.* High-Voltage Trench-Gate Hole-Gas Enhancement-Mode HEMT with Multi-Conduction Channels [J]. Science China Information Sciences, 2018,61:1-10.
- [12] Liu Y, Yao W, Liu H, *et al.* Multi-Channel AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes with a Half Through-Hole[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021,133:1-7.
- [13] Ma J, Erine C, Xiang P, *et al.* Multi-Channel Tri-Gate Normally-on/off AlGaIn/GaN MOSHEMTs on Si Substrate with High Breakdown Voltage and Low ON-resistance[J]. Applied Physics Letters, 2018,113 (24) 1-6.
- [14] Erine C, Ma J, Santoruvo G, *et al.* Multi-Channel AlGaIn/GaN In-Plane-Gate Field-Effect Transistors[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020,41 (3):321-324.
- [15] Ma J, Kampitsis G, Xiang P, *et al.* Multi-Channel Tri-Gate GaN Power Schottky Diodes with Low ON-Resistance[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 40 (2):275-278.

- [16] Sun Y, Wang Y, Tang J, *et al.* A Breakdown Enhanced AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diode with the T-Anode Position Deep into the Bottom Buffer Layer [J]. Micromachines, 2019,10(2):91-100.
- [17] Tang C, Xie G, Zhang L, *et al.* Electric Field Modulation Technique for High-Voltage AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes[J]. Chinese Physics B, 2013,22 (10):1-7.
- [18] Wang Y, Li Z Y, Hao Y, *et al.* Evaluation by Simulation of AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diode (SBD) with Anode-Via Vertical Field Plate Structure [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018,65 (6): 2552-2557.
- [19] Eldad B T, Frank B, Oliver H, *et al.* AlGaIn/GaN/GaN:C Back-Barrier HFETs with Breakdown Voltage of Over 1 kV and Low $RON \times A$ [J]. IEEE Trans Electron Devices, 2010,57:3050-3058.

收稿日期:2022-12-06

作者简介:



李洪亮(1996-),男,本科就读于贵州大学,现硕士就读于四川大学,主要研究方向为整流器件和电路设计, E-mail: 2020222050162@stu.scu.edu.cn。

(上接第 27 页)

作者简介:



李佳潞(1990-),工程师,硕士研究生,毕业于中北大学,主要从事短毫米波及太赫兹器件的研制, E-mail:714664700@qq.com。

(上转第 38 页)

作者简介:

胡孔一(1988-),男,博士研究生,从事电磁场与微波研究; E-mail:hukongyi230@163.com。