

# 宽禁带半导体碳化硅 IGBT 器件研究进展与前瞻\*

张峰, 张国良

(厦门大学物理科学与技术学院, 厦门 361005)

**摘要:** 碳化硅 (SiC) 宽禁带半导体材料是目前电力电子领域发展最快的半导体材料之一。绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 是全控型的复合器件, 具有工作频率高、开关损耗低、电流密度大等优点, 是高压大功率变换器中的关键器件之一。但 SiC IGBT 存在导通电阻高、关断损耗大等缺点。针对上述挑战, 对国内外现有的新型 SiC IGBT 结构进行了总结。分析了现有的结构特点, 结合新能源电力系统的发展趋势, 对 SiC IGBT 的结构改进进行了归纳和展望。

**关键词:** 碳化硅; 双极型; 导通电阻; 关断损耗

**中图分类号:** TN323+.4; TN386.2   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1681-1070 (2023) 01-010109

**DOI:** 10.16257/j.cnki.1681-1070.2023.0047

**中文引用格式:** 张峰, 张国良. 宽禁带半导体碳化硅 IGBT 器件研究进展与前瞻[J]. 电子与封装, 2023, 23 (1): 010109.

**英文引用格式:** ZHANG Feng, ZHANG Guoliang. Research progress and prospect of wide-band-gap semiconductor silicon carbide IGBT [J]. Electronics & Packaging, 2023, 23(1):010109.

## Research Progress and Prospect of Wide-Band-Gap Semiconductor Silicon Carbide IGBT

ZHANG Feng, ZHANG Guoliang

(College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Silicon carbide (SiC) wide-band-gap semiconductor material is one of the fastest-developing semiconductor materials in the field of power electronics. Insulator gate bipolar transistor (IGBT) is a full-control compound device with advantages of high frequency, low switching loss and large current density, which is one of the significant devices in high-voltage high-power converters. However, SiC IGBTs have disadvantages like high on-state resistance and large off-state loss. In view of the above challenges, the available new SiC IGBT structures around the world are summarized. Based on the analysis of the existing structural characteristics and the development trend of new energy power systems, the structural improvements of SiC IGBTs are summarized and prospected.

**Keywords:** silicon carbide; bipolar; on-state resistance; off-state loss

### 1 引言

功率半导体技术作为微电子器件领域的重要分

支,在绿色能源、航天、交通运输和电力传输等方面有着广泛的应用,并对人们的生产生活方式产生了十分深刻的影响。目前,功率半导体技术水平的高低已成为一个国家科技发展水平和综合实力的重要体现,因

\* 基金项目:国家自然科学基金(12142406)

收稿日期:2022-11-03

E-mail: 张峰 [fzhang@xmu.edu.cn](mailto:fzhang@xmu.edu.cn)

此当今世界各国特别是发达国家都把该技术作为科技发展的重中之重。半导体器件自身性能与其所使用的材料密切相关。在半导体材料的发展历程中,人们习惯于把硅(Si)、锗(Ge)等材料称为传统半导体材料,将砷化镓(GaAs)和磷化铟(InP)等称为窄禁带半导体材料,将碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)和氮化铝(AlN)等称为宽禁带半导体材料<sup>[1-4]</sup>。与传统半导体材料 Si 和窄禁带半导体材料 GaAs 相比,SiC 材料具有带隙宽(是 Si 的 2.9 倍)、临界击穿电场高(是 Si 的 10 倍)、热导率高(是 Si 的 3.3 倍)、载流子饱和漂移速度高(是 Si 的 1.9 倍)以及化学稳定性和热稳定性极佳等特点,是制造新一代高温、大功率电力电子和光电子器件的理想材料。在具备相同击穿电压的情况下,SiC 基功率器件的导通电阻只有 Si 器件的 1/200,极大地降低了变换器的导通损耗,这使得 SiC 材料在功率半导体领域有着巨大的应用潜力<sup>[5]</sup>。另外,SiC 器件的散热效率高,能大幅降低器件外围冷却设施的体积和重量,因此,SiC 功率器件也被称为绿色能源革命中的核心器件。经过三十多年的发展,SiC 在材料生长与器件制备等方面都取得了长足的进展,其商品化水平不断提高。进一步推动 SiC 产业化发展进程、扩大 SiC 功率器件市场份额已成为宽禁带半导体材料与器件领域的重要研究课题。

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为功率半导体全控型器件,集功率 MOSFET 的高速性能与双极型器件的高增益于一体,具有输入阻抗高、电压控制功耗低、控制电路简单、驱动功率小、通态电阻低等特性,广泛应用于新能源汽车、轨道交通、智能电网、绿色能源等领域。SiC 基 IGBT 较 Si 基 IGBT 具有高耐压、高功率的特点,然而其在发展过程中也遇到较大的挑战,如导通特性较差、电导调制不强、关断速度较慢等。为解决以上问题,新型结构的 SiC 基 IGBT 结构应运而生。

本文概述了 SiC IGBT 的发展历程,梳理了 P 沟道 SiC IGBT 和 N 沟道 SiC IGBT 的经典器件,总结了 SiC IGBT 的发展现状和发展趋势。

## 2 SiC IGBT 发展历程

通常来讲,全控型半导体器件可以依照其导通状态下的载流子类型分为单极型半导体器件和双极型半导体器件,在每一类中又可以分为电流控制型和电压控制型<sup>[6]</sup>。

在较低阻断电压的应用中,大多使用单极型半导

体器件。最常用的单极型半导体器件是金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET),目前利用 SiC 材料制备沟槽栅 MOSFET(UMOSFET)或者双注入 MOSFET(DMOSFET 或 DiMOSFET)已经有大量的报道。虽然使用 SiC 材料可以使临界电场增加,但随着阻断电压的提高,单极型半导体器件的漂移区电阻不可避免地迅速增加,导通压降也随之增加。因此在更高电压的应用中,单极型半导体器件往往难以胜任。

双极型半导体器件同样具有厚的漂移区,与单极型半导体器件不同,对于双极型半导体器件,如 IGBT、栅控晶闸管(GTO)和电力晶体管(GTR),在导通状态下,少数载流子会注入到漂移区中,形成漂移区的电导调制现象,提高了漂移区的导电能力,降低了器件的导通压降。然而这些少数载流子在关断过程中需要被去除,又导致了大的关断损耗,因此 GTO 等器件只适用于对开关频率要求不高的高阻断电压应用中。目前 SiC GTO 和 SiC GTR 也有相当多的报道。

GTO 和 BJT 的开启和关断依赖栅极或基极的控制,这一弱点使电路设计者需要为其设计复杂的控制系统。为了解决这一问题,Baliga 提出了 IGBT 的概念,其兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点,并逐步发展出了多种 IGBT 结构。近年来,由于各项工艺的进步,越来越多的研究小组参与到 SiC IGBT 的研究中。

SiC IGBT 的发展历程较短,国内外 SiC IGBT 部分发展历程如图 1 所示,1996 年,RAMUNGUL 等人制作出了第一个沟槽结构的 6H-SiC IGBT,通过该器件验证出在相同的漂移层厚度下,SiC IGBT 的最大电流密度比 SiC MOSFET 高十倍左右<sup>[7]</sup>。1999 年,SINGH 等人制作出了第一个 4H-SiC P 沟道沟槽型 IGBT,在室温下其导通电阻为  $32 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,该器件设计阻断电压为 790 V,但由于没有解决寄生 NPN 晶体管的高增益问题,其在 85 V 时便被击穿<sup>[8]</sup>。之后的 SiC IGBT 基本使用 4H-SiC 制作,因为相比于其他晶型的 SiC,4H-SiC 拥有较高的热导率,而且其电子迁移率各向异性弱,迁移率更高。同时从单晶衬底角度看,4H-SiC 的施主杂质浓度更高,这意味着器件的电阻率也更低。2005 年,ZHANG 等人首次制作出 10 kV N 沟道沟槽型 IGBT,其在室温下比导通电阻为  $17 \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在 SiC IGBT 器件研究历程的前期,研究多是集中在 P 沟道的 SiC IGBT,原因是相比于 N 型的衬底,P 型衬底的电阻率更低且缺陷更多<sup>[9]</sup>。随着研究的不断深入,

SiC IGBT 的性能也逐步提升, 导通电阻更是呈现不断进步的趋势, 2007 年, ZHANG 等人引入电荷存储层 (CSL), 在消除 JFET 效应的同时增强电导调制效应, 使制作出的器件导通电阻进一步降低, 该器件阻断电压为 7.5 kV, 在室温下其比导通电阻约为  $26 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{210}$ 。2010 年, WANG 等人在独立 4H-SiC 外延片上使用翻转工艺在 Si 面上生长 P 型集电区, 制作出了 N 沟道平面型 IGBT, 该器件的漂移区厚度为  $180 \mu\text{m}$ , 其阻断电压为 20 kV, 在  $300 \text{ W/cm}^2$  的功率密度下, 电流密度可达到  $27.3 \text{ A/cm}^{211}$ 。2013 年, YONEZAWA 等人在翻转工艺的基础上采用翻转注入外延的方法制作出了带有 CSL 的 N 沟道平面型 IGBT, 该器件阻断电压可达 16 kV, 电流密度为  $100 \text{ A/cm}^2$  时, 正向导通电压为  $5 \text{ V}^{12}$ 。2014 年, HINOJOSA 等人利用 N 型衬底制备出了阻断电压为 20 kV 的 N 沟道平面型 IGBT, 该器件的比导通电阻为  $28 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{213}$ 。2018 年, YANG 等人

研制出国内首个 12 kV N 沟道平面型 IGBT, 该器件在集电极电压为 12 kV 时, 漏电流小于  $10 \mu\text{A}$ , 当正向导通电流密度为  $24 \text{ A/cm}^2$  时, 比导通电阻为  $140 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{214}$ 。2019 年, WEN 等人研制出国内首枚 10 kV P 沟道平面型 IGBT, 该器件采用六角形元胞设计并使用阶梯空间调制型结终端拓展 (SSM-JTE) 终端结构, 在  $300 \text{ W/cm}^2$  的功率密度下, 其比导通电阻为  $56.92 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 同时在集电极电压为  $-10 \text{ kV}$  时, 其漏电流仅为  $50 \text{ nA}^{15}$ 。2020 年, 国家电网研制了国内首枚 18 kV/12.5 A N 沟道 SiC IGBT。2022 年, 杨晓磊等人在 N 型 SiC 衬底上制备了国内首枚超 20 kV SiC N 沟道 IGBT 器件, 该器件阻断电压为 20.08 kV 时, 漏电流仅为  $50 \mu\text{A}$ , 当栅电极施加 20 V 电压、集电极电流为 20 A 时, 器件的导通电压为 6.0 V, 此时器件的微分比导通电阻为  $27 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{216}$ 。自此, 国产 SiC IGBT 的研究开始紧跟国际步伐。



图 1 国内外 SiC IGBT 部分发展历程

### 3 SiC IGBT 的结构与特性发展

IGBT 器件具有 P 沟道和 N 沟道两种类型。P 沟道 IGBT 可以看作 P 沟道 MOSFET 和 NPN 型双极型

晶体管的混合, N 沟道 IGBT 可以看作 N 沟道 MOSFET 和 PNP 型晶体管的混合。P 沟道与 N 沟道 IGBT 结构如图 2 所示<sup>16</sup>。可以看出, N 沟道 IGBT 基本结构与 P 沟道 IGBT 相同, 掺杂类型与 P 沟道 IGBT 反型。

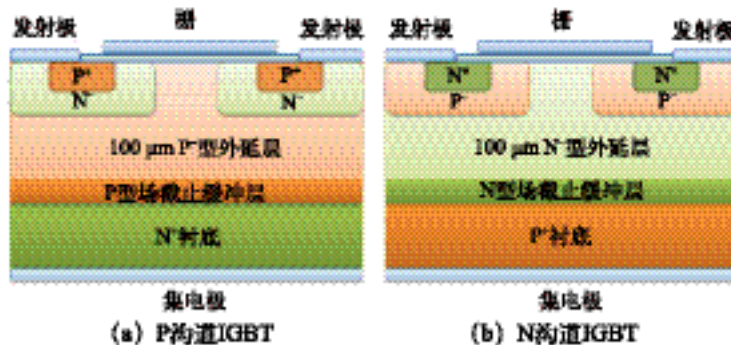


图 2 P 沟道与 N 沟道 IGBT 结构

#### 3.1 P 沟道 SiC IGBT 器件结构与特性

P 沟道 SiC IGBT 的率先发展源于高质量 N 型掺杂 SiC 衬底的成熟应用。因此, 早期 SiC IGBT 器件研究重点为 P 沟道 IGBT 器件。由于早期高温离子注入的工艺不成熟, P 沟道 IGBT 多采用沟槽栅结构。SINGH 等人<sup>17</sup>于 2003 年制备出了最早的 P 沟道槽栅

4H-SiC 及 6H-SiC IGBT, P 沟道沟槽栅 IGBT 基本结构如图 3 所示。

SINGH 对器件在不同温度下的性能进行了测试, 在室温下 ( $300 \text{ K}$ ), 该器件阈值电压约为  $-28 \text{ V}$ , 栅击穿电压约为  $-40 \text{ V}$ , 导通电压约为  $-7.1 \text{ V}$ , 导通电流为  $20 \text{ mA}$  时, 导通压降约为  $-11.25 \text{ V}$ , 器件的漏-源击穿

电压约为 -85 V。较低的击穿电压预示着需要增加 P<sup>+</sup> 缓冲层的厚度或者 P<sup>+</sup> 缓冲层的掺杂。当器件栅压偏置在 -32 V 时,室温下其微分比导通电阻为 32.68 Ω·cm<sup>2</sup>;当温度上升至 350 °C 时,微分比导通电阻为 0.226 Ω·cm<sup>2</sup>。当器件栅压偏置在 -34 V 时,在室温下其微分比导通电阻为 66.7 Ω·cm<sup>2</sup>;温度升高到 400 °C 时,器件表现出了较好的输出特性,导通电流密度大幅上升,微分比导通电阻仅为 0.297 Ω·cm<sup>2</sup>。

随着温度的增加,器件具有更好的输出特性,可能源于以下原因:①欧姆接触电阻随着温度的增加而减小;②器件栅氧化层界面态密度随着温度的增加而降低;③漂移区载流子寿命随着温度的增加而增加;④PN 结内建电场随着温度的增加而减小;⑤杂质的激活率随着温度的增加而增加。在研究器件栅漏电的测试中发现,当温度超过 100 °C 时,器件出现了栅极漏

电,该漏电会随着发射极-集电极偏压的增加而降低,这预示着在高温下,槽栅结构 IGBT 器件在槽栅底部边角处可能会存在漏电路径。器件在不同温度下的输出特性曲线及栅极漏电情况如图 4 所示。

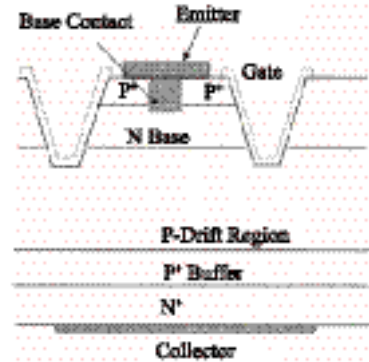


图 3 P 沟道沟槽栅 IGBT 基本结构<sup>[7]</sup>

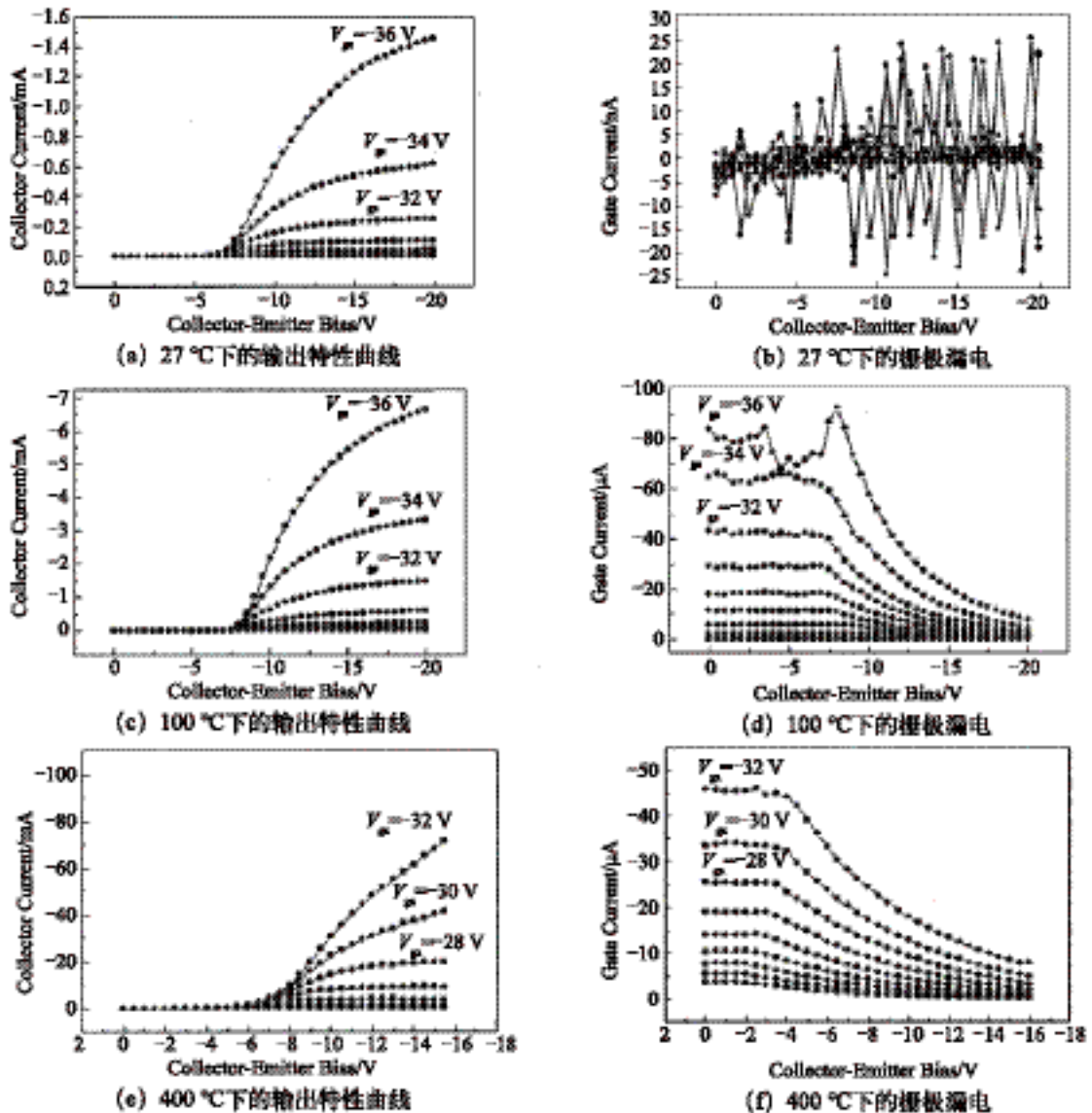


图 4 器件在不同温度下的输出特性曲线及栅极漏电情况<sup>[7]</sup>



SINGH 还比较了 400 °C 下沟道位于不同晶面上的器件的性能, 结果显示, 在 (11 $\bar{2}$ 0) 晶面上制备的器件的集电极电流大约比 (1100) 晶面上制备的器件高两个数量级。对这一现象的解释是 SiC-SiO<sub>2</sub> 表面的碳簇会影响表面质量, 进而造成界面态密度的增加, 导致沟道载流子迁移率的下降。(11 $\bar{2}$ 0) 表面碳原子相比于 (1100) 面上更少, 也许是导致高迁移率的原因。SINGH 的工作没有使用有效的终端技术, 导致阻断电压 (85 V) 远低于理论值 (约 3600 V)。栅氧化层退火工作的缺失也导致沟道载流子迁移率的低下, 进而导致器件沟道电阻的增加。P 发射极欧姆接触特性也有待提高, 质量较低的欧姆接触导致了较高的正向压降, 但槽栅结构以及 (11 $\bar{2}$ 0) 沟槽晶面的选择为后续沟槽栅 IGBT 器件的研究提供了思路。然而沟槽栅 IGBT 的栅氧化层击穿等问题导致器件的可靠性较低, 随着高温离子注入技术的解决, 研究的重点转移到了平面栅 IGBT 上。

2006 年, ZHANG 等人<sup>[8]</sup>第一次制备了平面栅 P 沟道 IGBT。采用 JFET 区注入制备的 SiC P 沟道 IGBT 如图 5 所示, 器件元胞大小为 29  $\mu\text{m}$ , 使用高质量的 N 型衬底, 外延生长 2  $\mu\text{m}$  的 P 型缓冲层, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 之后生长 50  $\mu\text{m}$  掺杂浓度为  $2 \times 10^{14} \sim 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  的 P 型外延层。N 阱和 P 型发射极分别使用氮 (N) 和铝 (Al) 离子注入形成, 相邻 N 阱之间的 JFET 区利用离子注入降低了 JFET 电阻, 注入浓度为  $1 \times 10^{16} \sim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 器件使用离子注入形成的场环作为终端保护, 离子注入激活温度约为 1700 °C。使用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 厚度约为 1  $\mu\text{m}$  的场氧化层, 栅介质层通过热氧化形成, 厚度为 40~60 nm, 经过湿氧再氧化后, 再在一氧化氮 (NO) 环境下退火, 保证栅氧化层质量。器件的 N 型欧姆接触使用 Al/Ni 作为接触金属, P 型欧姆接触使用 Ni 作为接触金属, Ti/Au 作为背金属, 整个器件有源区面积约为 4.5  $\text{mm}^2$ 。

平面栅 IGBT 阻断特性曲线如图 6 (a) 所示, 在栅压为 0 V 时, 阻断电压约为 5.8 kV, 此时漏电流密度小于 0.02  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 。栅压为 -30 V 时, 25 °C 下, 微分比导通电阻约为 570  $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 没有表现出良好的输出特性。不同温度下器件输出特性曲线如图 6 (b) 所示, 可以看到, 当温度为 300 °C 时, 比导通电阻下降为 118  $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。比导通电阻随温度的增加而减小的主要原因是载流子寿命的增加, 测试结果显示, 室温下双极型载流子寿命约为 370 ns, 导致器件的电导调制

效率很低, 导通电阻较大。温度提高后, 漂移区双极型载流子寿命增加, 使导通电阻大大减小。类似结构的 PMOSFET 器件载流子迁移率测试结果显示, 沟道载流子迁移率峰值为 2.35  $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。迁移率低的原因一是通过离子注入形成的 P 型沟道的低迁移率特性, 二是 SiO<sub>2</sub>/SiC 表面的固定电荷。该器件的阈值电压仅为 -12 V, 满足了工业界 -20 V 以内阈值电压的要求。

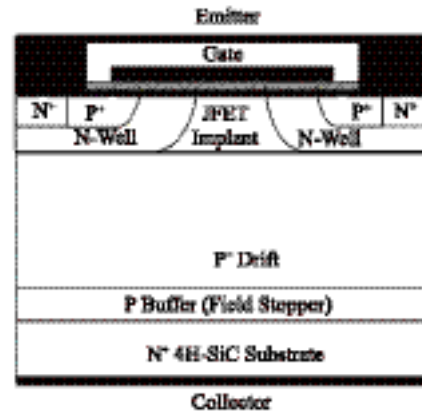
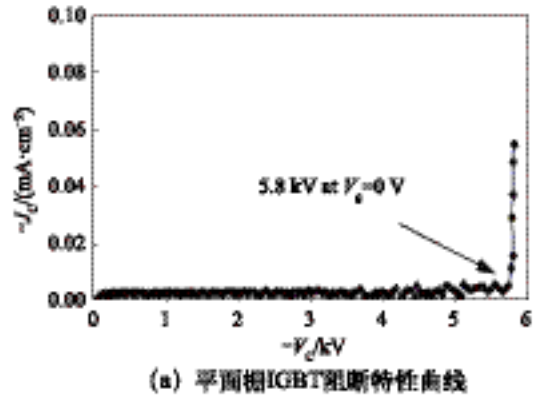
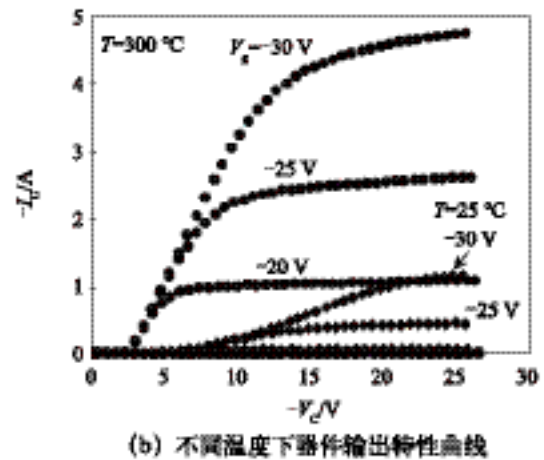


图 5 采用 JFET 区注入制备的 SiC P 沟道 IGBT<sup>[8]</sup>



(a) 平面栅 IGBT 阻断特性曲线



(b) 不同温度下器件输出特性曲线

图 6 平面栅 IGBT 阻断特性曲线与不同温度下器件输出特性曲线<sup>[8]</sup>

ZHANG 还对器件的动态特性进行了测试。导通状态下, 栅压偏置为 -27 V 时, 集电极电流为 0.75 A,

集电极电压偏置为 -400 V，将器件关断用时约为 750 ns；当温度上升至 130 °C 时，器件的双极型载流子寿命由 370 ns 上升至约 1.1 μs，关断用时大大增加。开关特性测试结果显示，器件的开启时间要远高于关断时间，这是由于器件具有高的密勒电容。ZHANG 指出，将 JFET 区双极型载流子寿命提高到 2 μs 以上、沟道迁移率提高到 10 cm<sup>2</sup>/(V·s) 以上时，可以获得较低的比导通电阻。该工作是对 P 沟道平面栅 IGBT 的首次探索，其使用离子注入的方法制作出 N 阱和 P 发射区，并实现了平面栅 IGBT 的制作，同时利用离子注入降低 JFET 区域的电阻，并指出了双极型载流子寿命对器件输出特性的重要性，分析了沟道迁移率较低的原因，为之后的平面栅 IGBT 的制作提供了参考。

2013 年，KATAKAMI 等人<sup>[9]</sup>制备了高沟道载流子迁移率的 P 沟道 IGBT，最大载流子迁移率达到了 13.5 cm<sup>2</sup>/(V·s)。P 沟道 SiC IGBT 器件结构如图 7 所示。器件以 N 型掺杂作为衬底，器件外延层包括一个 76 μm 厚、掺杂浓度为 1.2×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> 的 P 型漂移层和一个 2.5 μm 厚、掺杂浓度为 1.8×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> 的 P 型缓冲层，用以阻断 12 kV 的电压。器件漂移区载流子寿命为 0.8~1.6 μs，使用 2 个注入集成方案的 JTE 作为终端保护。器件单元长度、沟道长度和 JFET 区长度分别是 15 μm、1.5 μm 和 3 μm。

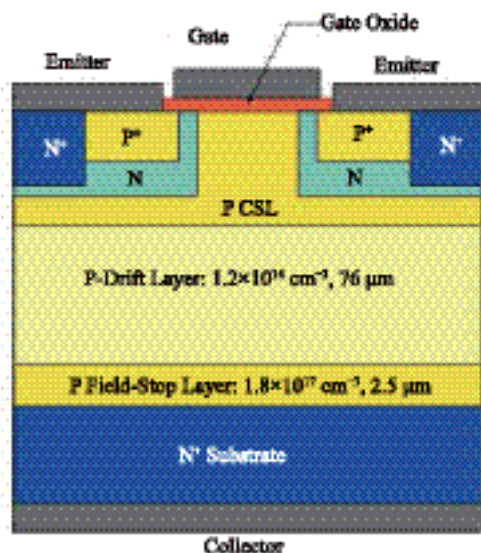
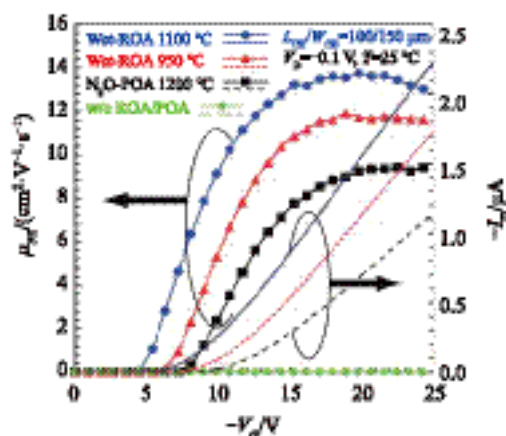


图 7 P 沟道 SiC IGBT 器件结构<sup>[9]</sup>

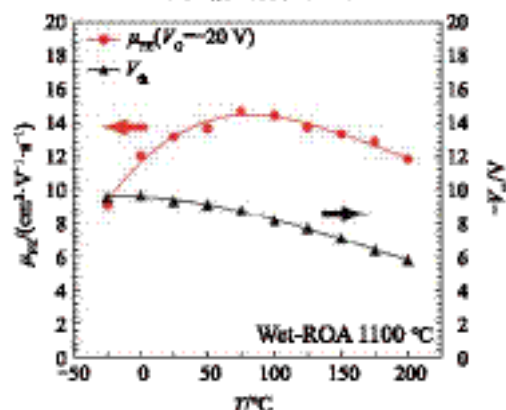
为了探寻最合适的栅氧化层形成方法，KATAKAMI 比较了采用不同栅氧化层退火方法的器件的特性。作者制备了 3 个 MOSFET 器件，经过 1200 °C 干氧化形成栅氧化层，之后在 950 °C 或 1100 °C 下进行湿氧二次氧化（样品 1、2），或者在 1200 °C 下进行一氧化二氮（N<sub>2</sub>O）退火（样品 3）。结果

显示，在相同的栅压下，采用 1100 °C 湿氧再氧化的方法制成栅氧化层的器件（样品 2）具有最高的沟道迁移率，为 14.7 cm<sup>2</sup>/(V·s)，同时拥有最大的沟道电流，其在 25 °C 下阻断电压大约为 10.2 kV，漏电电流密度为 1 μA/cm<sup>2</sup>，器件的微分比导通电阻为 24 mΩ·cm<sup>2</sup>。1100 °C 下进行湿氧再氧化退火的器件比在 950 °C 下进行湿氧再氧化退火的器件导通特性更好。采用 N<sub>2</sub>O 对栅氧化层进行退火的器件具有较低的载流子迁移率和沟道电流。

KATAKAMI 还比较了工作在不同温度下、通过 1100 °C 湿氧二次氧化栅进行退火的器件的一些特性，SiC P 沟道 MOSFET 器件输出特性曲线如图 8 (a) 所示，阈值电压及沟道载流子迁移率与温度的关系如图 8 (b) 所示，随着温度的提高，阈值电压的绝对值发生轻微的下，沟道载流子迁移率随温度先轻微上升，之后下降。KATAKAMI 的工作主要针对器件的沟道迁移率，作者分析了不同的栅氧化层形成方法，且分析了器件阈值电压和沟道载流子迁移率随温度变化的关系，为后续沟道迁移率的提升提供了有效渠道。



(a) 输出特性曲线



(b) 阈值电压及沟道载流子迁移率与温度的关系

图 8 SiC P 沟道 MOSFET 器件输出特性曲线和阈值电压及沟道载流子迁移率与温度的关系<sup>[9]</sup>

2019 年, WEN 等人<sup>[15]</sup>制作出 10 kV P 沟道 IGBT, 该器件使用六角形元胞设计和 SSM-JTE 终端结构, 10 kV P 沟道 IGBT 器件结构如图 9 a) 所示, SSM-JTE 结构如图 9 b) 所示。由于平面型器件制作工艺较为简单且可以保证较高的栅氧化层可靠性, 因此该器件使用平面栅结构。整个器件的外延生长都是在一个晶轴偏 4°角、350 μm 厚的 4 英寸 4H-SiC 衬底片上。首先生长一层 2 μm 厚、掺杂浓度为  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的 P 型缓冲层, 之后继续生长 100 μm 厚、掺杂浓度为  $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  的 P 型漂移区。漂移区的载流子少子寿命为 1.2 μs。为

保证栅氧化层的可靠性, 同时尽可能地提升器件的通态特性, 在条形元胞中 JFET 区域的宽度设计为 10 μm, 六角形元胞中 JFET 区域的宽度设计为 8 μm。这样可以保证在阻断电压为 10 kV 的情况下, 两种元胞的栅氧化层电场强度均小于 4.5 MV/cm。考虑到器件制作过程中掺杂的激活率问题, 器件的 SSM-JTE 的宽度设计为 530 μm, 这样可以保证足够宽的工艺窗口。同时, 为降低器件开启时的电阻, 该器件使用自对准技术制作沟道, 所制作出来的器件有源区为 2.25 mm<sup>2</sup>, 整个器件为 3 mm×3 mm。

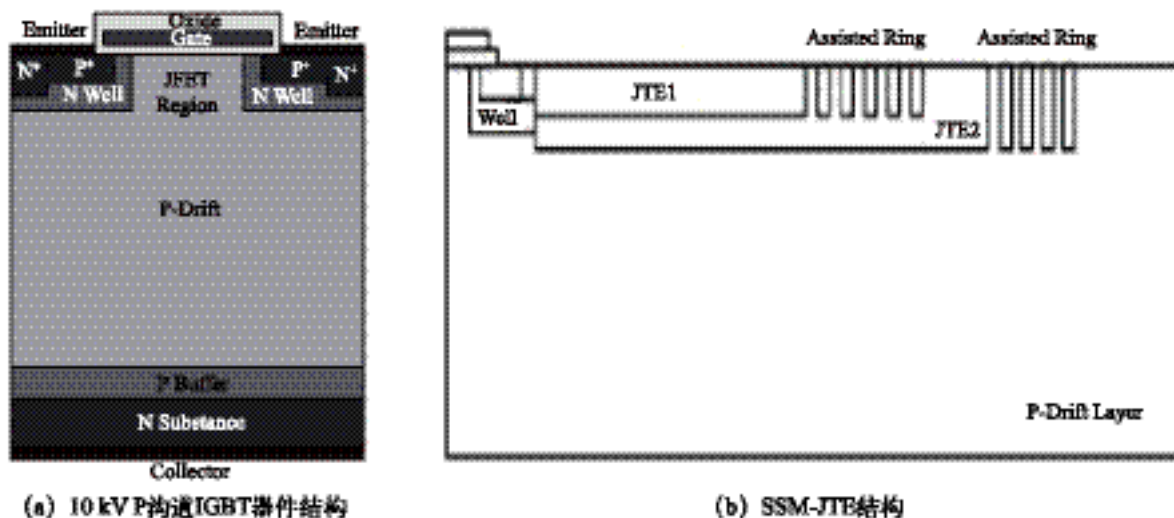


图 9 10 kV P 沟道 IGBT 与 SSM-JTE 结构<sup>[15]</sup>

使用不同终端结构的六角形元胞器件阻断特性曲线如图 10 所示, 在阻断电压为 -10 kV 的情况下, 宽度为 200 μm 的双 JTE 结构和宽度为 500 μm 的双 JTE 结构漏电流分别为 970 nA 和 590 nA, 而 SSM-JTE 结构的漏电流仅为 50 nA, 原因为 SSM-JTE 结构内部的环可以消除电场拥挤现象, 从而降低漏电流。

出特性曲线如图 11 所示。可以看出, 与仿真数据相比, 实际制作出来的器件导通电阻偏大, 其主要原因为以下 3 点: (1) 在界面处, 表面复合降低了双极型载流子的寿命; (2) 源区的欧姆接触电阻较高, 因而产生了较高的压降; (3) 缓冲层和发射层所形成的 PN 结注入效率较低。根据输出曲线可知, 条形元胞和六角形元胞设计的器件, 在 300 W/cm<sup>2</sup> 的条件下, 输出电流分别为 34.2 A/cm<sup>2</sup> 和 38.9 A/cm<sup>2</sup>。六角形元胞设计的器件性能优于条形设计, 其原因为六角形结构的宽长比为  $4.1 \times 10^5$ , 而条形结构的宽长比为  $2.9 \times 10^5$ 。该工作比较了条形结构设计及六角形结构设计的输出特性, 为以后的器件元胞结构设计提供了参考; 同时, 在终端中使用的 SSM-JTE 结构也在阻断状态下大幅降低了器件的漏电流, 这表明与双 JTE 结构相比, SSM-JTE 更适用于高压器件之中。

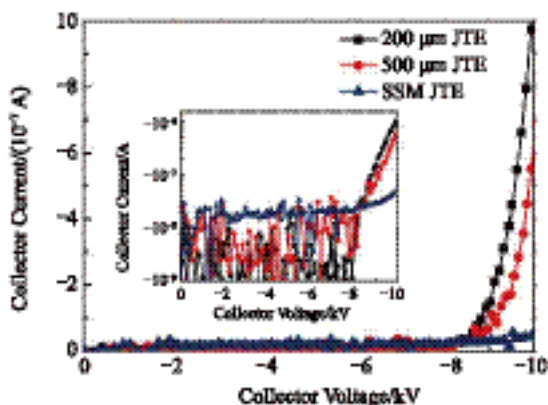


图 10 使用不同终端结构的六角形元胞器件阻断特性曲线<sup>[15]</sup>  
使用条形元胞设计和六角形元胞设计的器件输

自 2002 年 SINGH 等人制作出第一个 P 沟道 SiC 槽栅 IGBT 以来, 科研人员对于 P 沟道 SiC IGBT 的研究已走过二十个年头, 器件结构的研究重点也由沟槽栅逐渐转换为平面栅, 这是工艺的逐步成熟与器件性



能需要的共同选择(高温离子注入技术问题得到了解决,同时平面栅结构的栅氧化层可靠性更高),针对平面栅 IGBT 的结构特点,科研人员做出了以下优化:引入自对准源区注入方法,在器件中实现了窄沟道,使器件表现出较好的导通特性和高温稳定性;针对平面栅 SiC IGBT 中难以产生电导调制的 JFET 区域,采用 CSL 结构代替 JFET 区的离子注入,在降低 JFET 电阻的同时避免了离子注入的不利影响,还通过抑制 NPN 晶体管提高了 P<sup>+</sup> 发射极的注入效率。其他一些因素对器件特性的影响同样重要,如少数载流子的寿命、沟道迁移率、器件元胞结构与终端设计等,作者认为,相关的研究对以后的器件制备将产生深远的影响。在对 P 沟道 SiC IGBT 进行探索的过程中,科研人员还发现相比于 N 沟道 SiC IGBT, P 沟道 SiC IGBT 拥有更好的阻断特性,且在高温下导通特性更好。相信未来 P 沟道 SiC IGBT 将在相应的领域发挥巨大的作用。

时 N 沟道 IGBT 具有与现有电力电子系统兼容的特性,因此 N 沟道 IGBT 器件的研究具有很高的现实意义。

2008 年, DAS 等人<sup>[20]</sup>制备了第一个 13 kV N 沟道 IGBT,其结构如图 12 所示,器件在使用高质量 p 型衬底的基础上制备, JFET 区进行 N 注入实现更高的掺杂,离子注入退火温度为 1600 °C 以上,使用 Si 抑制表面重构和 Si 原子蒸发,场氧厚度为 0.8 μm,栅氧化层厚度为 50 nm,使用热氧化的方式生长,在 NO 环境下退火。经测试显示,该器件的开启电压大约为 3 V,微分比导通电阻约为 22 mΩ·cm<sup>2</sup>,器件阻断电压达到了 13 kV,不同温度下器件的输出特性如图 13 ( a ) 所示,随着温度的上升,器件的导通特性下降,跨导降低。器件的开启电压随温度的上升而略微增加,不同温度下器件的阻断特性如图 13 ( b ) 所示,阻断电压随温度的上升而略有下降,但在 200 °C 的温度下依然能够阻断超过 10 kV 的电压。该器件表现出了良好的导通特性,但动态特性稍有不足,电压上升的时延较长,这表明该器件栅极结构设计存在问题,需进一步完善相关结构。

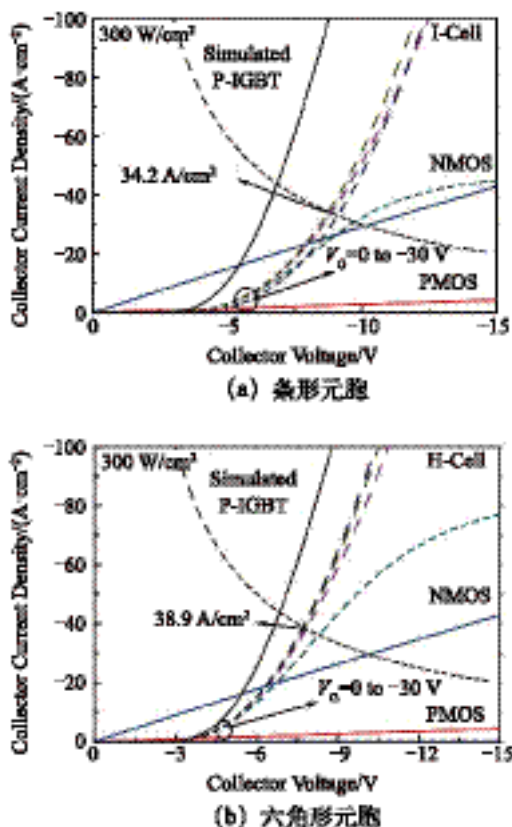


图 11 条形元胞与六角形元胞设计的 IGBT 输出特性曲线<sup>[21]</sup>

### 3.2 N 沟道 SiC IGBT 的研究、制备

由于 N 沟道 IGBT 需要高质量的 P 型衬底, P 型衬底这些年来一直发展较慢,在一定程度上延缓了 SiC N 沟道 IGBT 器件的发展。然而,由于电子相对空穴具有较高的迁移率,能够带来更低的导通压降,同

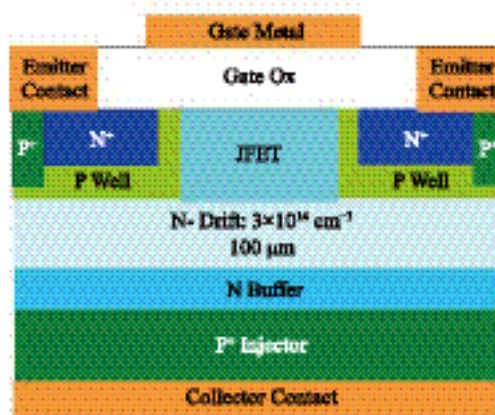


图 12 13 kV N 沟道 SiC IGBT 结构<sup>[20]</sup>

2014 年, YONEZAW 等人<sup>[22]</sup>制备了翻转型注入外延 N 沟道 SiC IGBT,其基本结构如图 14 所示。器件使用 N 型衬底,在 (0001) 面上依次生长 N 型缓冲层, 150 μm 厚的 N 型漂移区, N<sup>+</sup> 缓冲层, P<sup>+</sup> 集电极区; 翻转器件后去除 N 型衬底和 N 型缓冲层, 并生长 N 型 CSL 层。离子注入形成 P 阱底部后进行 P 型外延生长,注入形成 N 型 JFET 区、P<sup>+</sup> 基区以及 N<sup>+</sup> 源区。器件的终端由两个 box 的 JTE 形成,总长度为 750 μm。栅氧化层经过干氧化后在富 N 环境下退火形成。器件元胞大小为 14.8 μm,器件尺寸为 8 mm×8 mm,器件有源区面积大小为 0.37 cm<sup>2</sup>。测试结果显示,在栅压为



0 V 时, 器件达到了 16 kV 的阻断电压, 导通电流分别为 20 A 和 60 A 时, 正向压降分别为 4.8 V 和 7.2 V, 微分比导通电阻为  $23 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 器件开启电压约为 4.8 V。在可靠性方面, 器件的阈值电压稳定性如图 15 a) 所示, 器件在栅压分别为 -30 V 和 30 V 两种情况下, 经过 1000 s 的老化测试, 阈值电压依然保持稳定, 最大阈值电压偏移在 0.1 V 以内。不同温度下器件的输出特性如图 15 b) 所示, 结果显示器件的输出特性具有良好的温度稳定性。

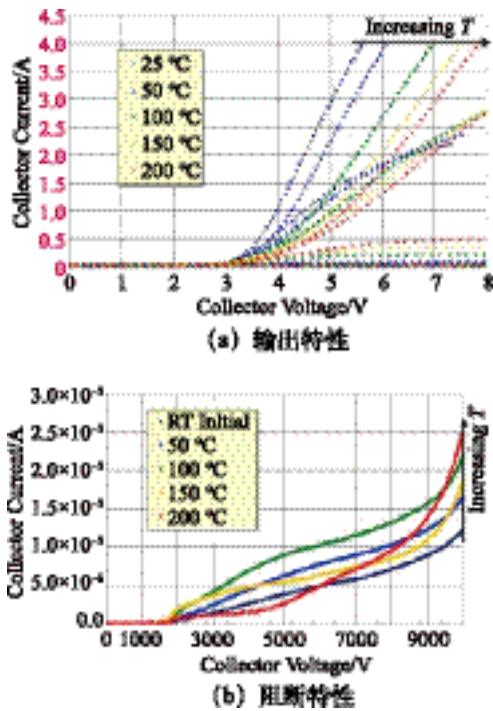


图 13 不同温度下 13 kV N 沟道 SiC IGBT 的输出特性和阻断特性<sup>[20]</sup>

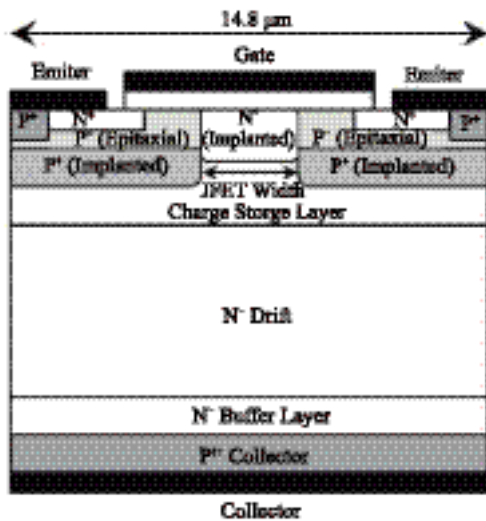
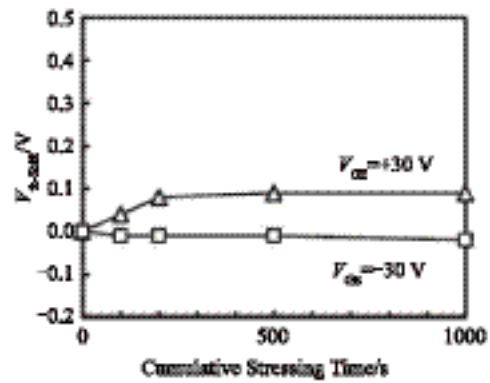
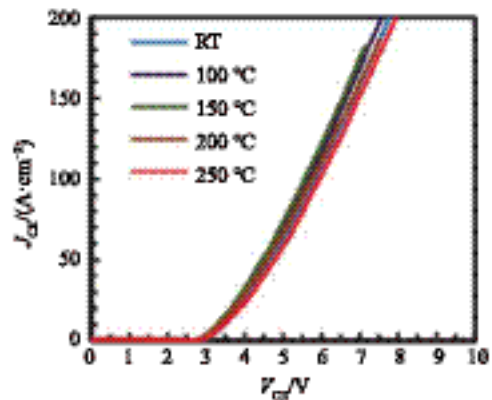


图 14 翻转型注入外延 N 沟道 SiC IGBT 基本结构<sup>[12]</sup>



(a) 阈值电压稳定性



(b) 不同温度下的输出特性

图 15 翻转型注入外延 N 沟道 SiC IGBT 阈值电压稳定性与不同温度下器件的输出特性<sup>[21]</sup>

YONEZAW 很好地制备出 16 kV N 沟道 IGBT, 但其方法十分复杂, 所需外延及离子注入工序极多, 有很大的制备难度。目前有关 N-IGBT 成功制备的报道并不是很多, 主要是因为高质量的 P<sup>+</sup> 衬底难以获得, 而采用翻转外延生长的方式又会因为晶面选择和外延层质量等因素存在影响器件性能的问题。

2022 年, 杨晓磊等人制备出了一种耐压超过 20 kV 的超高压 SiC N 沟道 IGBT<sup>[16]</sup>, 其基本结构和制备方案分别如图 16、17 所示。该团队通过在 N 型 4H-SiC 衬底上生长所需的关键外延层, 包括 N<sup>-</sup> 漂移层、N<sup>+</sup> 缓冲层以及 P<sup>+</sup> 集电极层, 采用 SiO<sub>2</sub> 作为各区域的注入掩模, 使用多次离子注入形成 P 阱、P<sup>+</sup> 区域和 N<sup>+</sup> 区域; 同时对 JFET 区域进行单独的 N 型离子注入, 所有注入完成后在 1650 °C 的 Ar 环境下退火以激活注入离子。退火后, 通过牺牲氧化去除表面碳层, 湿法表面清洗后放入高温氧化炉中进行干氧化, 形成栅氧化层。采用 NO 高温退火技术, 有效降低栅氧界面缺陷密度, 最终将氧化层厚度控制在 50 nm 左右。在栅氧工艺完成后, 通过在栅氧化层上沉积多晶 Si 实现栅电极的制作。采用氧化硅 / 氮化硅 (SiO<sub>2</sub>/SiN) 介质实现栅极

和发射极的隔离以及表面钝化。发射极的欧姆接触由金属 Ni 实现，介质孔刻蚀后通过加厚 Al 层完成发射极单胞之间的互联。器件正面结构完成后通过减薄 / 背面研磨的方法去除 N 型衬底，保留部分 P<sup>+</sup> 层，接着蒸发背面欧姆金属，并使用激光退火完成背面的欧姆接触。

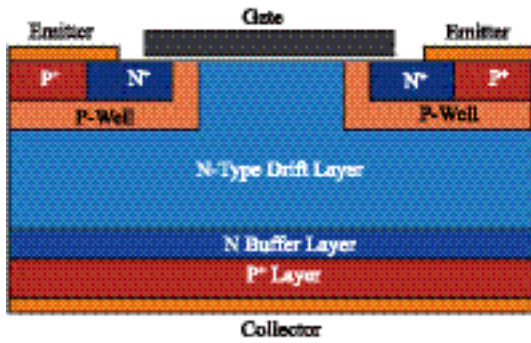


图 16 超高压 SiC N 沟道 IGBT 器件元胞的基本结构<sup>[6]</sup>  
超高压 SiC N 沟道 IGBT 阻断特性如图 18 a) 所

示,该器件击穿电压可以达到 20 kV,当集电极电压为 20.08 kV 时,漏电流为 50  $\mu$ A。超高压 SiC N 沟道 IGBT 输出特性如图 18 b) 所示,该器件在栅压为 20 V、集电极电流为 20 A 时,其微分比导通电阻为 27  $m\Omega \cdot cm^2$ 。

该团队还使用了长时间的高温氧化工艺对器件进行少子寿命的提升,通过高温热氧化过程,使得部分碳原子扩散到体区并填补碳空位,消除 Z<sub>1/2</sub> 缺陷中心。高温热氧化处理前后超高压 SiC N 沟道 IGBT 的输出特性如图 19 所示,芯片 A 引入了载流子寿命提升工艺,芯片 B 未引入载流子寿命提升工艺。观察发现,芯片 B 在栅极电压为 20 V、集电极电流密度为 70 A/cm<sup>2</sup> 的条件下,器件导通压降为 16.2 V,引入载流子寿命提升工艺后,芯片 B 在同等测试条件下,其导通压降降至 6.5 V,这一结果也恰好验证了载流子寿命的提升能有效提高 SiC N 沟道 IGBT 器件的导通能力。

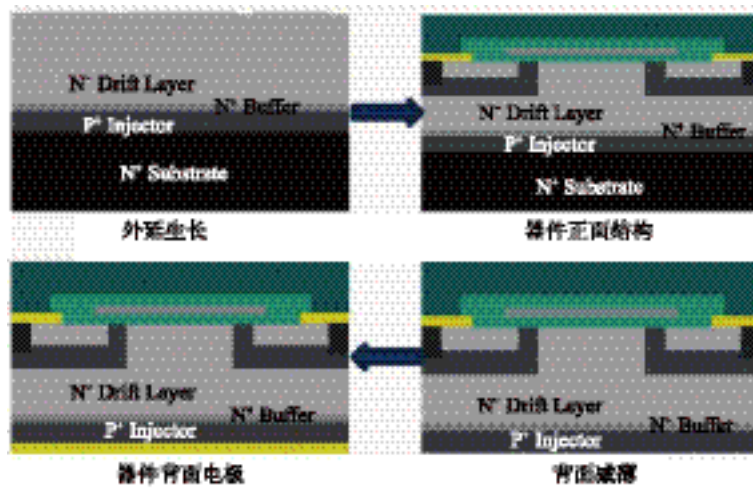


图 17 超高压 SiC N 沟道 IGBT 制备方案<sup>[6]</sup>

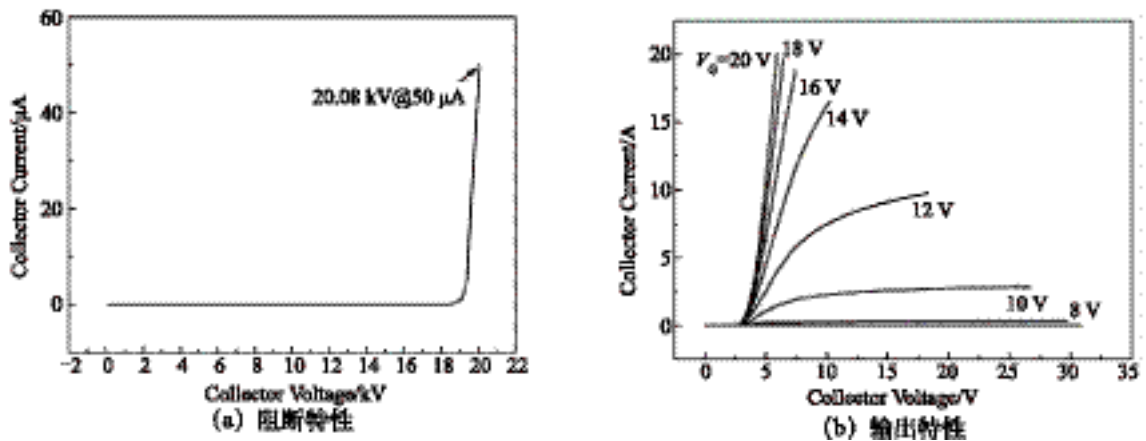


图 18 超高压 SiC N 沟道 IGBT 的阻断特性和输出特性<sup>[6]</sup>

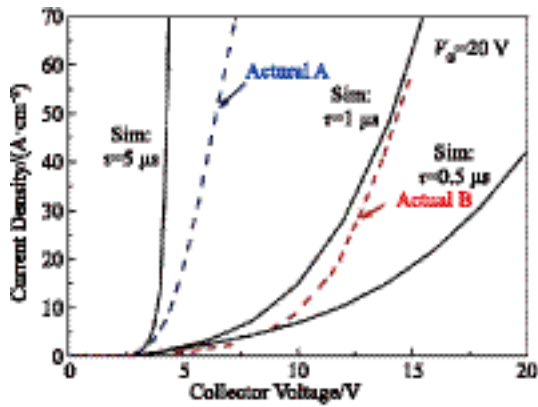


图 19 高温热氧化处理后超高压 SiC N 沟道 IGBT 的输出特性<sup>[16]</sup>

该超高压 SiC N 沟道 IGBT 器件在制备过程中通过引入高温热氧化的载流子寿命提升技术,有效提高了其电导调制效应。且该器件在栅压为 20 V、集电极电流为 20 A 时,其微分比导通电阻为 27 mΩ·cm<sup>2</sup>,进一步缩小了与国际先进器件之间的差距。

2022 年, WATANABE 等人<sup>[21]</sup>对 SiC IGBT 引入了盒式元胞布局,该布局在传统的条形元胞布局的基础上进行了优化,增强了器件的电导调制,降低了器件的通态损耗,小幅增加了器件的关断损耗, N 沟道 IGBT 器件结构如图 20 所示,条形元胞布局与盒式元胞布局如图 21 所示。该器件基于 N 型的 SiC 衬底,生长 95 μm 厚的 N 型漂移层,用来承受 10 kV 的阻断电压,再生长一层 N 型的缓冲层,由于没有可用的 P 型衬底,之后需要在缓冲层的下面外延生长一层高掺杂的 P 型层作为器件的空穴注入层。接着将器件的 N 型衬底去除,在器件漂移区的顶部制作表面结构。

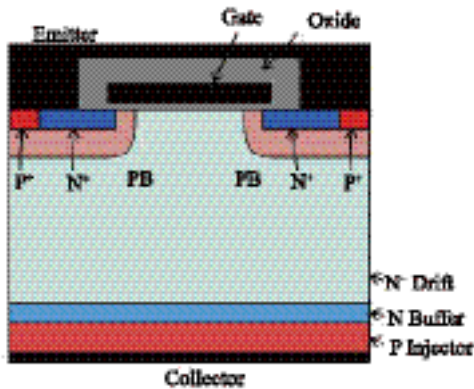


图 20 N 沟道 IGBT 器件结构<sup>[21]</sup>

接着, WATANABE 讨论了器件的静态特性,盒式元胞布局的 IGBT 器件相比条形元胞布局在同样的面积下具有更大的沟道宽度,这会增强器件源区的电子注入。另外,盒式元胞布局的 IGBT 器件的顶部 P+ 区

域面积更小,这将抑制发射极的空穴泄漏,同时可以增强器件的电导调制。条形元胞布局和盒式元胞布局的 IGBT 器件的输出特性对比如图 22 所示,对于 200 A/cm<sup>2</sup> 的电流密度,盒式元胞布局的 IGBT 器件和条形元胞布局的 IGBT 器件导通电压分别为 6.5 V 和 7.4 V,盒式元胞布局使导通电压得到了降低。另外,盒式元胞布局的 IGBT 器件的特征微分比导通电阻为 13 mΩ·cm<sup>2</sup>,该值比条形元胞布局的 IGBT 器件低了 35%。

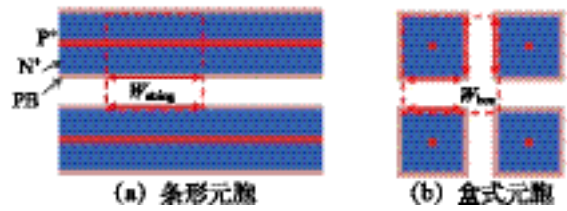


图 21 条形元胞布局与盒式元胞布局<sup>[21]</sup>

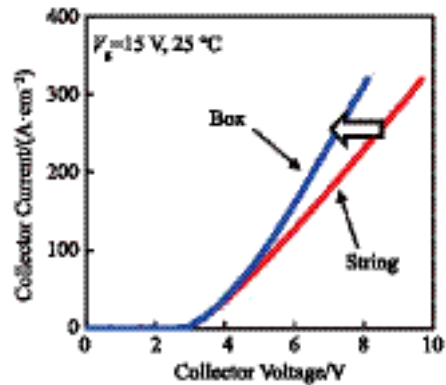


图 22 条形元胞布局和盒式元胞布局的 IGBT 器件的输出特性对比<sup>[21]</sup>

随后, WATANABE 分析了器件的动态特性,盒式元胞布局的 IGBT 器件的关断速度会比同样条件下的条形元胞布局的 IGBT 器件略慢,并且关断损耗会有轻微的增加。3.6 kV 和 125 A/cm<sup>2</sup> 的转换条件下两种元胞布局的 IGBT 器件结构对应的关断曲线如图 23 (a) 所示,相比条形元胞布局的 IGBT 器件,盒式元胞布局的 IGBT 器件关断速度从 13.8 kV/μs 降低到了 12.5 kV/μs,关断损耗从 53.1 mJ/cm<sup>2</sup> 增加到了 55.9 mJ/cm<sup>2</sup>。不同集电极电流下两种元胞布局的 IGBT 器件结构对应的关断损耗如图 23 (b) 所示,即使在电流为 300 A/cm<sup>2</sup> 的转换条件下,盒式元胞布局的 IGBT 器件相比条形元胞布局的 IGBT 器件关断损耗也只增加了 7%。盒式元胞布局提高了 IGBT 器件靠近发射极的漂移区载流子浓度,这部分载流子的抽取造成了器件的关断速度降低和关断损耗增加。



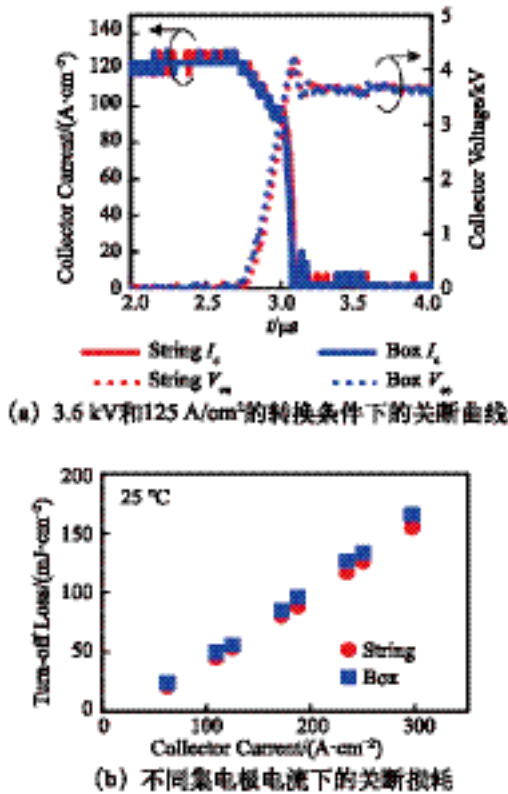


图 23 两种元胞布局的 IGBT 器件的关断曲线与关断损耗<sup>[21]</sup>

最后, WATANABE 讨论了盒式元胞布局对 IGBT 器件闩锁效应的影响。相比于传统的条形元胞布局, 盒式元胞布局的 IGBT 器件 P 型体区和发射极电极的接触面积更小, 从而具有更大的接触电阻, 使得 IGBT 器件更加不易发生闩锁。300 A/cm<sup>2</sup> 的状态下盒式元胞布局的 IGBT 器件结构对应的关断曲线如图 24 所示, 器件在 300 A/cm<sup>2</sup> 的状态下也没有发生闩锁效应。

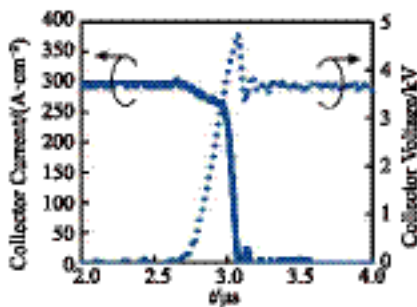


图 24 300 A/cm<sup>2</sup> 的状态下盒式元胞布局的 IGBT 器件的关断曲线<sup>[21]</sup>

盒式元胞结构与六角形元胞结构设计思路相同, 相比于条形元胞分布, 盒式元胞分布的沟道宽度更大, 且该布局更易产生电导调制, 因此盒式元胞布局的导通特性更好, 该布局提升了器件靠近发射极的漂移区载流子浓度, 故关断时间更长, 盒式元胞布局因其具有发射极更大的接触电阻, 同样可以提升抗闩锁能力。

相比于 P 沟道 SiC IGBT, N 沟道 SiC IGBT 发展较晚, 这是由于 SiC 有低电阻率以及低缺陷密度的 N 型衬底而缺少高质量的 P 型衬底, 在这些高电阻率和缺陷密度的 P 型 SiC 衬底上直接生长出来的 N 型 SiC IGBT 质量很差。但是因为 SiC 材料电子的迁移率比空穴的迁移率高, 理论上来说, N 沟道 SiC IGBT 将比 P 沟道 SiC IGBT 具有更好的导通特性, 所以科研工作者一直致力于高质量 N 沟道 SiC IGBT 的研发。由于对 N 沟道 SiC IGBT 的研究较晚, P 沟道 SiC IGBT 中已摸索的工艺如反向外延生长和自对准技术可直接使用到 N 沟道 SiC IGBT 中。但是对于 N 沟道 SiC IGBT 的动态特性仍需要进一步研究, 无论是栅极与栅极驱动的优化设计, 还是关断时电场的平缓度, 都是未来器件设计与应用中需重点关注的内容。

#### 4 结束语

本文从 P 沟道 SiC IGBT 和 N 沟道 SiC IGBT 发展历史中的经典器件入手, 介绍了各种 SiC IGBT 器件的制作过程与相关性能, 并就 SiC IGBT 的工艺优化与结构优化进行了报道, 对比了 P 沟道 SiC IGBT 和 N 沟道 SiC IGBT 的优缺点。P 沟道 SiC IGBT 在阻断能力与高温下的导通能力具有明显优势, 而 N 沟道 SiC IGBT 在常温下的导通能力更具优势。SiC IGBT 的结构由沟槽型逐步变为平面型, 这与相关工艺的进步与平面型器件与生俱来的优势有关。平面型器件的 JFET 区电阻较高, 因此 CSL 应运而生, 其在降低 JFET 电阻的同时避免了离子注入的不利影响。除了传统的元胞结构外, 六角形元胞结构与盒式元胞结构因其更高的宽长比更易获得更好的导通能力。对于 SiC IGBT, 终端结构同样重要, 优秀的终端结构可以减缓电场的拥挤效应, 进一步降低漏电流。

过去, 对 SiC IGBT 的研究主要集中在美国和日本, 国内起步较晚, 但是在高压大功率输电、轨道交通等领域的大量应用驱动以及国家能源转型和碳达峰等政策的指导下, 近几年中国的 SiC IGBT 研制取得了较好的成果和进展。目前 SiC IGBT 的相关工作还是以器件结构与仿真为主, 解决器件制造的相关问题, 制备出性能优异的 SiC IGBT 器件将是未来该领域重要的发展方向。在结构设计方面, 业界针对器件集电区和发射极的结构改进已经做了很多工作, 但超结 SiC IGBT 的设计相对较少, 还有很大的研发空间; 另外将 Si IGBT 的结构借鉴到 SiC IGBT 也是 SiC



IGBT 研发的重要思路,但是在借鉴的过程中要重点注意 Si 材料和 SiC 材料特性的差别,这对异质结、肖特基结等结构与 SiC IGBT 的结合会产生重大影响。除此之外,能否引入新的物理机制以优化 SiC IGBT 器件的性能也是值得进一步深入研究的课题。在实现能源转型、推进碳达峰与碳中和以及建立新型电力系统的重要应用背景下, SiC IGBT 器件的研究前景十分光明,其研制与应用一定会为社会和人类带来更加节能与清洁的美丽世界。

#### 参考文献:

- [1] 李晋闽. SiC 材料及器件研制的进展[J]. 物理, 2000, 29(8): 481-487.
- [2] MONROY E, OMN S F, CALLE F. Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors [J]. Semiconductor Science and Technology, 2003, 18(4): R33-R51.
- [3] 郝跃, 彭军, 杨银堂. 碳化硅宽禁带半导体技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 钱照明, 张军明, 盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161.
- [5] COOPER J A, AGARWAL A. SiC power-switching devices-the second electronics revolution? [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(6): 956-968.
- [6] BALIGA B J. Fundamentals of power semiconductor devices[M]. Boston: Springer US, 2008.
- [7] RAMUNGUL N, CHOW T P, GHEZZO M, et al. A fully planarized, 6H-SiC UMOS insulated-gate bipolar transistor [C]// 1996 54th Annual Device Research Conference Digest, 1996.
- [8] SINGH R, RYU S H, PALMOUR J W. High temperature, high current, p-channel UMOS 4H-SiC IGBT [C]// 1999 57th Annual Device Research Conference Digest (Cat. No. 99TH8393), 1999.
- [9] ZHANG Q, CHANG H R, GOMEZ M, et al. 10 kV trench gate IGBTs on 4H-SiC [C]// IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, 2005: 303-306.
- [10] ZHANG Q C, JONAS C, CALLANAN R, et al. New Improvement Results on 7.5 kV 4H-SiC p-IGBTs with  $R_{diffon}$  of  $26 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  at  $25^\circ\text{C}$  [C]// IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, 2007, 281-284.
- [11] WANG X K, COOPER J A. High-voltage n-channel IGBTs on free-standing 4H-SiC epilayers[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(2): 511-515.
- [12] YONEZAWA Y, MIZUSHIMA T, TAKENAKA K, et al. Low  $V_f$  and highly reliable 16 kV ultrahigh voltage SiC flip-type n-channel implantation and epitaxial IGBT [C]// IEEE International Electron Devices Meeting, 2013: 6.6.1-6.6.4.
- [13] HINOJOSA M, OGUNNIYI A, O'BRIEN H, et al. Evaluation of high-voltage, high-power 4H-SiC insulated-gate bipolar transistors [C]// IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2014: 101-104.
- [14] YANG X L, TAO Y H, YANG T T, et al. Fabrication of 4H-SiC n-channel IGBTs with ultra high blocking voltage [J]. Journal of Semiconductors, 2018, 39(3): 034005.
- [15] WEN Z X, ZHANG F, SHEN Z W, et al. Design and fabrication of 10-kV silicon-carbide p-channel IGBTs with hexagonal cells and step space modulated junction termination extension [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(6): 068504.
- [16] 杨晓磊, 李士颜, 赵志飞, 等. 超高压碳化硅 N 沟道 IGBT 器件的设计与制造[J]. 电子与封装, 2022, 22(4): 040102.
- [17] SINGH R, RYU S H, CAPELL D C, et al. High temperature SiC trench gate p-IGBTs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50(3): 774-784.
- [18] ZHANG Q C, JONAS C, RYU S H, et al. Design and fabrications of high voltage IGBTs on 4H-SiC [C]// IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, 2006: 1-4.
- [19] KATAKAMI S, FUJISAWA H, TAKENAKA K, et al. Fabrication of a P-channel SiC-IGBT with high channel mobility [J]. Materials Science Forum, 2013, 740-742: 958-961.
- [20] DAS M K, ZHANG Q J, CALLANAN R, et al. A 13 kV 4H-SiC n-channel IGBT with low  $R_{diffon}$  and fast switching [J]. Materials Science Forum, 2008, 600-603: 1183-1186.
- [21] WATANABE N, OKINO H, SHIMA A. Impact of cell layout on on-state and dynamic characteristics of N-channel SiC IGBTs [C]// IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), 2022: 85-88.



#### 作者简介:

张峰 (1981—), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 主要研究方向为宽禁带半导体碳化硅材料与器件;

张国良 (1999—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研究方向为碳化硅 IGBT 器件设计与研制。