

# 高压大功率碳化硅电力电子器件研制进展

柏松, 李士颜, 杨晓磊, 费晨曦, 刘奥, 黄润华, 杨勇

中国电子科技集团公司第五十五研究所, 宽禁带半导体电力电子器件国家重点实验室, 南京 210016

**摘要** 碳化硅电力电子器件已经成为国内外研究和产业化热点, 在一些应用领域正在逐步取代硅基电力电子器件。概述了碳化硅材料和器件的特性, 即具有高工作电压、高效率、高工作温度等优势。综述了国际上碳化硅电力电子器件技术的发展现状, 其中中低压器件发展已逐渐成熟, 高击穿电压器件研究成果展现出由碳化硅材料特性预测的性能优势。展示了宽禁带半导体电力电子器件国家重点实验室在该领域取得的最新技术进展, 建立了 600~3300 V 碳化硅肖特基二极管和 MOSFET 产品技术, 研制出国际先进水平的高压碳化硅 MOSFET 和 IGBT。

**关键词** 碳化硅; 电力电子; MOSFET; IGBT

碳化硅(SiC)作为继硅和砷化镓之后发展起来的宽禁带半导体的重要代表, 正在成为制作高性能电力电子器件的理想半导体材料, 已经显现出由其材料特性预测的性能优势, 部分 SiC 器件成功实现了产业化, 在一些重要的能源领域开始逐步取代硅基电力电子器件。

## 1 SiC 电力电子器件优势

更高电压、更高效率、更高功率密度代表了电力电子器件技术的发展主题。在 2020 年之前的 50 年中, 硅基电力电子器件技术日益成熟, 产业规模

不断壮大, 在能源领域发挥了不可或缺的作用。然而受材料特性所限, 硅基电力电子器件性能正在接近其理论极限<sup>[1]</sup>, 难以继续支撑技术和产业快速前进的要求。进入 21 世纪后, 尤其是在 2010—2020 年, 诸多新兴的半导体材料成为工业界的热点, 凭借优越的材料特性为电力电子器件技术带来了新的发展动力。

表 1<sup>[2-3]</sup>列出了硅和各类新兴半导体材料的特性, 其中 4H-SiC 和氮化镓(GaN)属于宽禁带半导体, 而氧化镓和金刚石为超宽禁带半导体。决定电力电子器件特性的主要材料参数包括禁带宽度、击穿场强、电子饱和漂移速度等。可以看出, 4H-

收稿日期: 2020-05-18; 修回日期: 2021-02-05

作者简介: 柏松, 研究员, 研究方向为宽禁带半导体电力电子器件, 电子信箱: 13809020747@163.com

引用格式: 柏松, 李士颜, 杨晓磊, 等. 高压大功率碳化硅电力电子器件研制进展[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 56-62; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.14.005

SiC、GaN、氧化镓以及金刚石的材料特性与硅相比优势非常显著,在学术界和产业界越来越受重视,其中以 SiC 为代表的宽禁带半导体的技术成熟度

较高,在一些应用领域开始逐步取代硅基电力电子器件。

表1 半导体材料特性

材料	禁带宽度/eV	击穿场强/ (MV·cm <sup>-1</sup> )	介电常数	电子迁移率/ (cm <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	电子饱和速度/ (10 <sup>7</sup> cm·s <sup>-1</sup> )	热导率/ (W·cm <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Si	1.12	0.3	11.8	1400	1.0	1.50
4H-SiC	3.26	3.0	9.7	947	2.0	4.90
GaN	3.39	3.3	9.0	1000	2.0	2.10
氧化镓	4.80	8.0	10.0	300	2.4	0.27
金刚石	5.45	10.0	5.5	2200	3.0	22.00

4H-SiC的禁带宽度几乎为硅的3倍,其本征载流子浓度远低于硅,热导率也达到硅的3倍,因而更加适合高温、高电压工作。10倍的击穿电场使SiC更适合制作高压器件,能够突破硅器件击穿电压的极限,达到10 kV甚至20 kV以上。高击穿电场使器件具有厚度更薄、掺杂浓度更高的漂移层,能够实现更低的比导通电阻和更高的导通电流密度。作为单极型器件的SiC金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET),其比导通电阻远低于同电压等级硅MOSFET,最高击穿电压可超越硅绝缘栅双极型晶体管(IGBT),同时具有低导通损耗和低开关损耗,从而能够实现更高的效率和更高的功率密度。

## 2 国际进展

在众多SiC电力电子器件中, SiC肖特基二极管是商业化程度最高的,通常采用结势垒肖特基(JBS)或者并和PIN肖特基(MPS)结构,具有反向漏电低、抗电流过冲能力强等优势。SiC肖特基二极管在600~3300 V电压范围内具备优越的性能和可靠性,已形成成熟的产品技术,广泛应用于开关电源、光伏发电、新能源汽车等领域。英飞凌公司发布的第六代SiC MPS二极管采用薄片、低势垒等先进技术<sup>[4]</sup>,降低导通电压,提高导通电流密度,进一步提升了产品的市场竞争力。在更高电压的应用方面, SiC肖特基二极管也颇具吸引力,15 kV SiC肖特基二极管已研制成功<sup>[5]</sup>,但其在高温、高阻

断条件下的可靠性有待验证。

SiC MOSFET是最为成熟、应用最广的SiC功率开关器件,具有高开关速度、低损耗和耐高温等优点,被认为是替代硅IGBT的最佳选择。SiC材料可以通过热氧化工艺在表面生长氧化层,因此SiC MOSFET可基本沿用硅基功率MOSFET的制备工艺。然而由于SiC/SiO<sub>2</sub>界面处存在大量的陷阱电荷和界面电荷,使得SiC MOSFET的沟道迁移率较低,进而使器件的导通电阻增加。同时, SiC的临界击穿电场强度更高且介电常数是SiO<sub>2</sub>的2.5倍,容易出现由于SiO<sub>2</sub>内电场强度过高而引发器件失效等可靠性问题。因此,必须优化设计SiC MOSFET的元胞结构和终端结构,同时深入研究栅氧介质的形成工艺。

SiC功率MOSFET通常采用如图1<sup>[6-7]</sup>所示的平面结构或者沟槽结构,在650~3300 V电压范围内已形成成熟的产品技术。SiC MOSFET沟道迁移率低的问题仍然比较突出,对于中低压器件(650~1700 V)沟道电阻占总导通电阻的比例较高。罗姆半导体集团和英飞凌科技公司采用沟槽结构SiC MOSFET,没有结型场效应晶体管(JFET)区,具有更高的沟道密度,同时沟道所在SiC晶面具有较高的沟道迁移率,因此能够实现更低的比导通电阻。而Cree和意法半导体两家公司采用平面结构SiC MOSFET,通过优化器件的结构设计,实现了性能和可靠性俱佳的产品技术,得到了广泛的应用。Cree发布的第三代平面结构SiC MOSFET,比导通电阻与击穿电压的关系如图2<sup>[8]</sup>所示,1200 V产品

的比导通电阻仅为  $2.7 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 在高压领域也显示出优越的性能, 10 和 15 kV 器件的比导通电阻分别为 123 和  $208 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 基本达到了单极型 SiC 器件的理论极限。

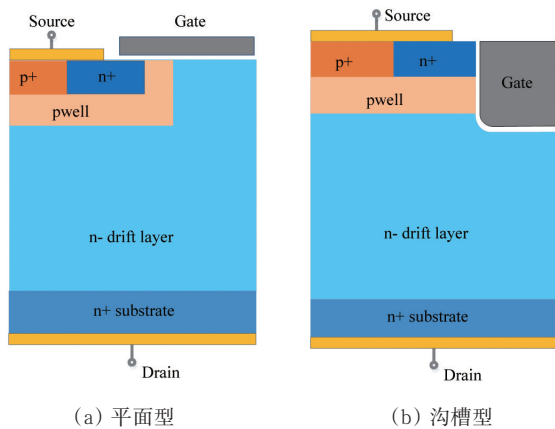


图1 SiC功率MOSFET器件结构

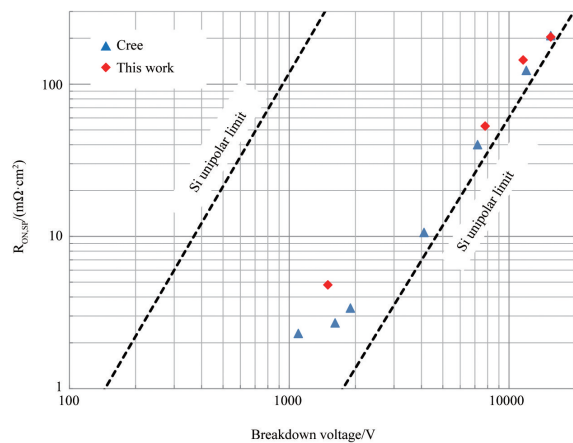


图2 Cree公司SiC MOSFET研制结果

SiC 功率 MOSFET 作为单极型器件, 导通状态下通过多数载流子导电, 当击穿电压达到 10 kV 甚至更高时, 高导通电阻成为限制其应用的重要问题。SiC IGBT 是一种双极型器件, 器件的背面多了一个 pn 结, 当器件处于导通状态时, 背面的 pn 结会将少子注入到漂移层, 产生电导调制效应, 从而实现更低的导通电阻, 更加适合智能电网等设施的高压大功率应用。由于 SiC 的电子迁移率比空穴迁移率高 1 个量级, n 沟道 SiC IGBT (N-IGBT) 比 p 沟道 SiC IGBT (P-IGBT) 具有更优越的导通和开关特

性。Cree 公司和日本产业技术综合研究所等报道了 12~27 kV 高压 SiC N-IGBT 的研制结果<sup>[6]</sup>, 微分比导通电阻与击穿电压的关系如图 3<sup>[9-13]</sup>所示, 15 kV SiC N-IGBT 的微分比导通电阻仅为  $14 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 而 27 kV SiC N-IGBT 也只有  $123 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ <sup>[13]</sup>, 充分显示出高压大功率的性能优势。SiC N-IGBT 需要 p 型 SiC 衬底, 其质量和性能均有待提升, 另外 SiC 的载流子寿命比较低, 限制了 SiC IGBT 性能的进一步提升。

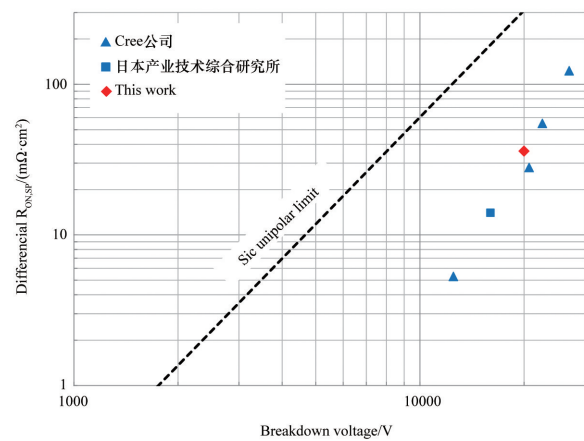


图3 高压SiC N-IGBT研制结果

### 3 SiC 电力电子器件最新研制进展

依托中国电子科技集团公司第五十五研究所建立的宽禁带半导体电力电子器件国家重点实验室, 致力于以 SiC 为代表的宽禁带半导体电力电子器件技术研究和开发, 建立了 600~3300 V SiC MPS 二极管和 1200~1700 V SiC MOSFET 产品技术, 在新能源汽车、光伏发电等领域实现了应用。为进一步发挥 SiC 电力电子器件高电压、大功率、高效率、高功率密度等优势, 本实验室面向国际科技前沿开展 SiC MOSFET、SiC IGBT 等器件技术的开发工作, 下面介绍近年来取得的主要进展。

#### 3.1 1200 V SiC MOSFET

SiC 功率 MOSFET 器采用了如图 1(a) 所示的平面型结构, 主要工艺过程见文献[14]。研制的第一代 1200 V/80 m $\Omega$  SiC MOSFET 器件, 芯片的有源区面积为  $8.5 \text{ mm}^2$ , 比导通电阻  $6.8 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。按照

工业级标准完成了器件的可靠性考核,考核项目及结果见表2。阈值电压和体二极管的稳定性是SiC MOSFET 器件可靠性的两项重要挑战。在环境温度150℃、栅极偏置电压+20 V和-10 V的应力条件

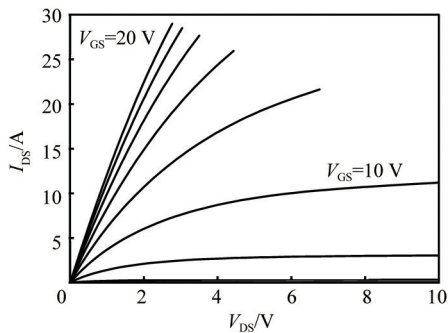
下,经过1000 h的考核, SiC MOSFET 器件的阈值电压漂移率均小于0.3 V。SiC MOSFET 器件的体二极管也经受了在环境温度150℃、1000 h的稳态工作寿命考核,显示出良好的稳定性。

表2 1200 V/80 mΩ SiC MOSFET可靠性考核结果

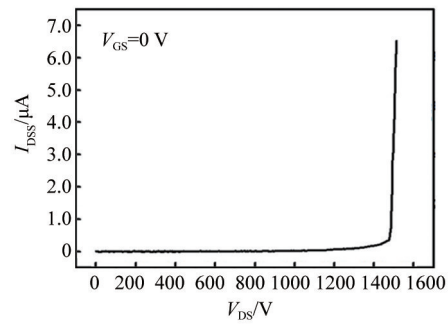
考核项目	条件	时间(次数)	结果
高温反偏	$V_{DS}=960\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}, T_A=150^\circ\text{C}$	1000 h	通过
温度循环	$T_A=-55\sim 150^\circ\text{C}$	1000次	通过
高温栅偏	$V_G=20\text{ V}/-10\text{ V}, V_{DS}=0\text{ V}, T_A=150^\circ\text{C}$	1000 h	通过
高温高湿反偏	$85^\circ\text{C}, 85\%\text{ RH(相对湿度)}, V_{DS}=100\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}$	1000 h	通过
稳态工作寿命	$I_{DS}=20\text{ A}, V_{GS}=20\text{ V}, T_J=150^\circ\text{C}$	1000 h	通过
体二极管稳态工作寿命	$I_{SD}=10\text{ A}, V_{GS}=0\text{ V}, T_J=150^\circ\text{C}$	1000 h	通过

为进一步提升SiC MOSFET 器件的导通电流密度,降低栅电容,对SiC MOSFET 器件的结构设计和制造工艺展开了改进研究。尤其是针对SiC MOSFET 沟道导通电阻大的问题,开发了栅氧前氮注入与栅氧后氮化退火相结合的工艺,实现了沟道迁移率的明显提升<sup>[15]</sup>。结合SiC MOSFET 单胞结构

优化以及JFET 区选择掺杂技术,研制出新一代1200 V/80 mΩ SiC MOSFET 器件,芯片有源区面积缩小到6 mm<sup>2</sup>,导通和阻断测试结果如图4所示,比导通电阻降低至4.8 mΩ·cm<sup>2</sup>,击穿电压为1500 V。该产品的可靠性和可生产性通过验证后,性价比将得到显著提升。



(a) 导通



(b) 阻断

图4 1200 V/80 mΩ SiC MOSFET 导通和阻断测试曲线

### 3.2 6.5~15 kV SiC MOSFET

采用平面型MOS结构,进行了高压SiC MOSFET 器件技术的开发。在3.3 kV以上的高压领域, SiC MOSFET 的沟道电阻在器件总电阻中的比例显著降低,而外延漂移层电阻成为最主要的组成部分,在做好器件耐高压设计之外,漂移区外延掺杂浓度和厚度的设计最为关键。图5展示了通过有限元仿真获得的SiC 器件击穿电压与外延掺杂浓度与厚度的关系,从理论上指导高压SiC MOSFET 器件外延结构的设计。研制的6.5 kV/150 mΩ SiC MOSFET 击穿电压达7.8 kV,在阻断电压为6.5 kV

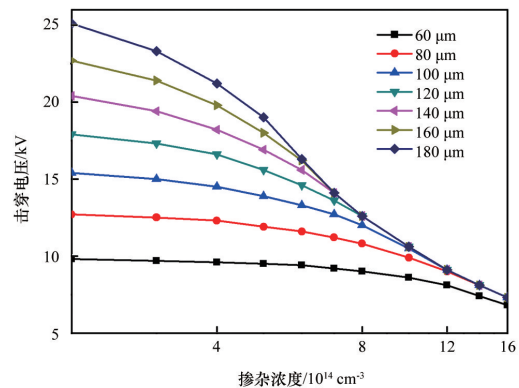


图5 SiC 器件击穿电压与外延层厚度以及浓度之间的关系

时漏电流小于  $2 \mu\text{A}$ , 有源区面积  $35.6 \text{ mm}^2$ , 比导通电阻  $53 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。将  $6.5 \text{ kV}$  SiC MOSFET 与  $6.5 \text{ kV}$  硅 IGBT 的开关损耗进行了对比, 结果如表 3 所示, SiC MOSFET 器件的总开关损耗仅为传统 Si-IGBT 模块的  $1/15$ , 因此更加适合高开关频率应用。

表 3 SiC MOSFET 和 Si IGBT 开关损耗对比

器件类型	测试条件	$E_{\text{ON}}/\text{mJ}$	$E_{\text{OFF}}/\text{mJ}$	$E_{\text{Total}}/\text{mJ}$
6.5 kV SiC MOSFET	3.5 kV	12.3	1.3	13.6
6.5 kV Si IGBT	20 A	93	112	205

开展了  $10$  和  $15 \text{ kV}$  SiC MOSFET 器件的设计

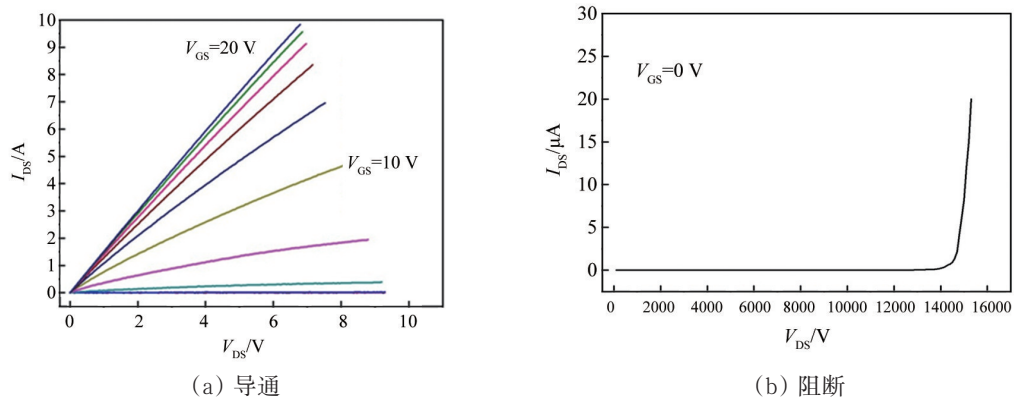


图 6  $15 \text{ kV}$  SiC MOSFET 导通和阻断测试曲线

### 3.3 $20 \text{ kV}$ SiC IGBT

图 7 为高压 SiC N-IGBT 的结构示意, 在  $n$  型 SiC 衬底上依次外延生长了  $20 \mu\text{m}$  厚的  $p^+$  少子注

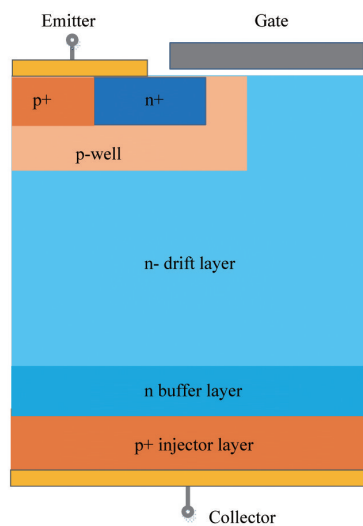


图 7 SiC N-IGBT 器件结构示意图

和制备。当栅极电压  $V_{\text{GS}}$  为  $20 \text{ V}$ 、漏源极电压  $V_{\text{DS}}$  为  $5.0 \text{ V}$  时, 研制的  $10 \text{ kV}/480 \text{ m}\Omega$  SiC MOSFET 器件的导通电流为  $10.4 \text{ A}$ , 比导通电阻为  $144 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。研制的  $15 \text{ kV}/680 \text{ m}\Omega$  SiC MOSFET 采用了掺杂浓度  $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度  $150 \mu\text{m}$  的 SiC 外延漂移层, 芯片尺寸为  $9.2 \text{ mm} \times 9.2 \text{ mm}$ , 有源区面积  $30.1 \text{ mm}^2$ , 采用了总宽度为  $1.5 \text{ mm}$  的场限环终端。图 6 为室温下  $15 \text{ kV}$  SiC MOSFET 的导通和阻断性能测试结果, 器件的击穿电压达  $15.5 \text{ kV}$ , 漏源极电压  $V_{\text{DS}}$  为  $6.5 \text{ V}$  时导通电流达  $9.6 \text{ A}$ , 对应的比导通电阻为  $204 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 为目前报道的最高水平。

入层,  $3 \mu\text{m}$  厚  $n$  型缓冲层以及  $180 \mu\text{m}$  厚掺杂浓度为  $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  的  $n$  型漂移层。器件的单胞长度为  $14 \mu\text{m}$ , MOS 沟道长度  $1.0 \mu\text{m}$ , 采用了总宽度为  $1.5 \text{ mm}$  的场限环终端, 芯片尺寸为  $9.2 \text{ mm} \times 9.2 \text{ mm}$ , 有源区面积  $30.1 \text{ mm}^2$ 。SiC N-IGBT 主要工艺过程见文献[16], 正面工艺与 SiC MOSFET 基本相同, 采用了  $1350^\circ\text{C}$  氧化工艺以提升载流子寿命。在正面工艺完成后通过研磨去除  $n$  型 SiC 衬底, 采用激光退火工艺在背面  $p^+$  注入层表面形成良好的  $p$  型欧姆接触。

室温下 SiC N-IGBT 导通和阻断特性的测试结果如图 8 所示, 其中阻断特性是将器件浸入在绝缘液体中测试获得的。当  $V_{\text{GE}}=0 \text{ V}$ 、 $V_{\text{CE}}=20 \text{ kV}$  时, 器件的漏电流为  $40 \mu\text{A}$ 。当  $V_{\text{GE}}=20 \text{ V}$ 、 $V_{\text{CE}}=6.5 \text{ V}$  时, SiC IGBT 的集电极电流达  $20 \text{ A}$ , 微分比导通电阻为  $36 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 显示出 SiC IGBT 作为双极型器件在高阻断电压、高导通电流密度等方面的突出优势。

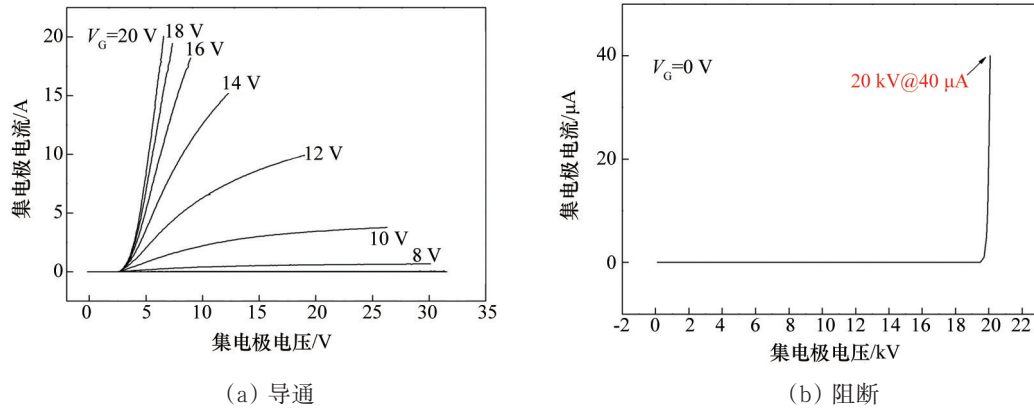


图8 20 kV SiC N-IGBT 导通和阻断测试曲线

## 4 结论

SiC 电力电子器件已经成为国内外研究和产业化热点。国内众多科研机构正在通过技术攻关追赶国际上突飞猛进的发展步伐,建立了中低压 SiC 肖特基二极管和 SiC MOSFET 产品技术,推进产品在数据中心电源、光伏发电、新能源汽车等领域的批量应用,面向国际科技前沿开展高压和超高压 SiC MOSFET、SiC IGBT 等器件技术的开发并取得重要成果,缩小了与国际先进水平之间的差距。“新基建”为宽禁带半导体器件带来新的发展机遇,我们应抓住机遇,加快提升以 SiC 为代表的新一代电力电子器件的技术水平,努力实现从跟跑到并跑再到领跑。

### 参考文献(References)

- [1] Iwamuro N, Laska T. IGBT history, state-of-the-art, and future prospects[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(3): 741-752.
- [2] 郝跃. 宽禁带与超宽禁带半导体器件新进展[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 58-61.
- [3] Rupp R, Gerlach R, Kabakow A, et al. Avalanche behaviour and its temperature dependence of commercial SiC MPS diodes: Influence of design and voltage class[C]. 2014 IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices Devices & IC's. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 67-70.
- [4] Rupp R, Elpelt R, Gerlach R, et al. A new SiC diode with significantly reduced threshold voltage[C]. 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 355-358.
- [5] Thoma J, Kolb S, Salzmann C, et al. Characterization of high-voltage-SiC-devices with 15 kV blocking voltage [C]/IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 946-951.
- [6] She X, Huang Q, Lucía Ó, et al. Review of silicon carbide power devices and their applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8193-8205.
- [7] Nakamura R, Nakano Y, Aketa M, et al. 1200V 4H-SiC trench devices[C]. PCIM Europe, 2014: 441-447.
- [8] Palmour J W, Cheng L, Pala V, et al. Silicon carbide power MOSFETs: Breakthrough performance from 900 V up to 15 kV[C]/2014 IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices Devices & IC's. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 79-82.
- [9] Fukuda K, Okamoto D, Okamoto M, et al. Development of ultrahigh-voltage SiC devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(2): 396-404.
- [10] Ryu S, Capell C, Cheng L, et al. Ultra high voltage (>12 kV), high performance 4H-SiC IGBTs[C]. 2012 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 257-260.
- [11] Ryu S, Capell C, Jonas C, et al. Ultra high voltage IGBTs in 4H-SiC[C]/Wide Bandgap Power Devices & Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 36-39.
- [12] Brunt V, Cheng L, O'Loughlin M, et al. 22 kV, 1 cm, 4H-SiC n-IGBTs with improved conductivity modulation [C]. 2014 IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 358-361.

- [13] Brunt V, Cheng L, O'Loughlin M, et al. 27 kV, 20 A 4H-SiC n-IGBTs[J]. Materials Science Forum, 2015, 821-823: 847-850.
- [14] Huang R, Tao Y H, Bai S, et al. Design and fabrication of 1.2 kV 4H-SiC DMOSFETs[C]//13th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 16-18.
- [15] Fei C, Bai S, Wang Q, et al. Influences of pre-oxidation nitrogen implantation and post-oxidation annealing on channel mobility of 4H-SiC MOSFETs[J]. Journal of Crystal Growth, 2020, 531(125338): 1-6.
- [16] 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): 034005-1-034005-3.

## Progress in developing high-voltage SiC power devices

BAI Song, LI Shiyan, YANG Xiaolei, FEI Chenxi, LIU Ao, HUANG Runhua, YANG Yong

State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Electronic Devices, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China

**Abstract** The SiC power devices are replacing the silicon-based devices in more and more applications, and becoming a research focus. The SiC device technologies have matured in recent years, and the advantages in performance over the Si device are demonstrated in this paper. The development of the high-voltage SiC power devices and some of the latest progresses are discussed.

**Keywords** SiC; power; MOSFET; IGBT ●



(责任编辑 王志敏)