

# 4H-SiC 功率肖特基二极管可靠性研究进展

张玉明, 袁昊, 汤晓燕, 宋庆文, 何艳静, 李东洵, 白志强

西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071

**摘要** 4H-SiC 功率器件作为一种宽禁带半导体器件, 凭借突出的材料优势具有耐压高、导电阻低、散热好等优势。近年来随着器件的逐步商用, 器件的可靠性问题成为新的研究热点。综述了本课题组近期在 4H-SiC 功率二极管可靠性方面的研究进展, 通过高温存储和高压反偏可靠性问题的研究, 分析了器件性能退化机制。通过重复雪崩可靠性问题的研究, 提出了一种可有效提升器件抗重复雪崩能力的终端方案。

**关键词** 4H-SiC; 二极管; MOSFET

作为第三代半导体材料(WBG)的典型代表, 4H 碳化硅(4H-SiC)具有禁带宽度大、临界击穿电场高、热导率高、饱和速度大等优势<sup>[1-3]</sup>。借助其优秀的材料特性, 4H-SiC 功率器件将拥有更高的转换效率及开关频率, 可以轻松实现高压大电流的高速开关。相较于传统 Si 器件, 4H-SiC 功率器件可以使相关应用的实现带来革命性的变化<sup>[4-5]</sup>, 近年来已获得了产业界的广泛关注。

自 2001 年 Infineon 推出第一款 4H-SiC 肖特基二极管产品以来, 4H-SiC 器件的研究得到了长足的发展。目前, 像 Infineon、Cree 等公司均已推出 600~1200 V/1700 V、最大电流为 40 A/50 A 的二极管产品<sup>[6-7]</sup>。近年来, 国内的 4H-SiC 功率二极管研

究及产业也日趋成熟: 泰科天润已成功推出 600~1700 V 4H-SiC 二极管产品<sup>[8]</sup>, 中国电子科技集团公司第五十五研究所 Huang 等<sup>[9]</sup>也已开发出超过 10 kV 的 SiC 结势垒肖特基(JBS)器件, 浙江大学 Ren 等<sup>[10]</sup>研制了 1.2 kV 的沟槽结势垒肖特基(TJBS)器件, 西安电子科技大学 Yuan 等<sup>[11-12]</sup>分别研制了超过 5 kV 的 SiC JBS 二极管及 TJBS 器件。各大厂商及研究机构在追逐更小芯片面积、更优良率的同时, 4H-SiC 功率器件的可靠性问题同样值得关注。这其中, 浪涌、高温存储及动态雪崩等可靠性问题得到了广泛的关注。北卡罗来纳大学的研究团队研究了 4H-SiC 肖特基势垒二极管(SBD)和 JBS 结构的浪涌特性, 并分析了相应的退化机制<sup>[13]</sup>;

收稿日期: 2020-08-21; 修回日期: 2021-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61804118); 陕西省重点研发计划项目(2018ZDL-GY01-03)

作者简介: 张玉明, 教授, 研究方向为宽禁带半导体材料和器件, 电子信箱: zhangym@xidian.edu.cn

引用格式: 张玉明, 袁昊, 汤晓燕, 等. 4H-SiC 功率肖特基二极管可靠性研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 63-68; doi: 10.3981/j.

issn.1000-7857.2021.14.006

浙江大学研究组<sup>[14-15]</sup>则通过对混合 pin/Schottky (MPS)离子注入工艺及结构设计的改进,有效提升了器件的额定浪涌电流。针对高温存储,研究热点则主要集中在研究器件在极端温度下的工作稳定情况,Banu等<sup>[16]</sup>研究了SiC SBD在-170~280℃温度下的长期工作稳定性;Godignon等<sup>[17]</sup>报道了具有耐高温和低温能力的300 V/5 A SiC肖特基二极管,这些二极管可在-170~300℃下稳定工作。关于重复雪崩研究,则主要集中在对于器件性能退化的研究及机制分析:Huang等<sup>[18]</sup>研究了两种不同型号4H-SiC JBS二极管在重复雪崩应力下的耐受能力,实验结果表明,两种器件都出现了正向导通电压降的退化和击穿电压漂移;2015年,英飞凌发布了第五代1200 V SiC二极管,器件中采用了新的芯片设计,有效提升了器件的雪崩特性<sup>[19]</sup>;东南大学研究团队同样对4H-SiC JBS的雪崩特性进行了研究,结果表明器件击穿电压在雪崩应力下发生漂移,而应力过程中热电子注入和俘获是导致器件击穿电压发生漂移的可能原因<sup>[20]</sup>。

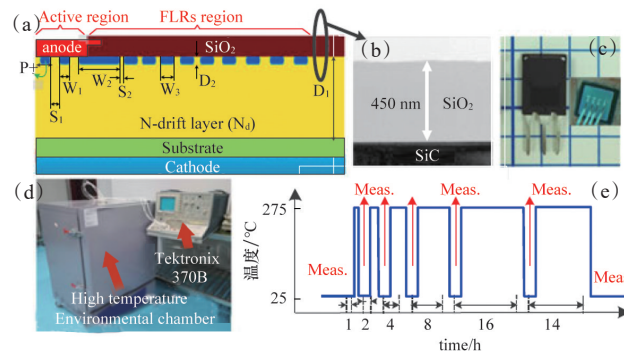
以下介绍本课题组在4H-SiC功率肖特基二极管在可靠性测试及分析方面的研究进展,即器件在高温存储、高压反偏、重复雪崩应力环境下的器件性能退化机制及加固方法。

## 1 高温存储

高温存储实验是一项评估电子元器件在高温环境下耐受能力的可靠性试验。通常实验方法是把样品暴露在高温且空气干燥的环境中,观测元器件性能在高温下的退化规律,它是筛选元器件过程中最常用的试验之一。4H-SiC JBS二极管在多种高温功率电子领域中的快速应用和发展也为该器件引入了高温可靠性问题,因此本课题组研究了高温存储应力对4H-SiC JBS性能的影响,并推断引起器件性能退化的内在物理机制。

图1(a)~(e)<sup>[21]</sup>分别展示了本次实验采用的具有场限环(FLRs)终端的自研4H-SiC JBS器件结构、所使用的测试平台及实验步骤。参照图1(e)所示,选取的应力温度为275℃,存储时长分别为

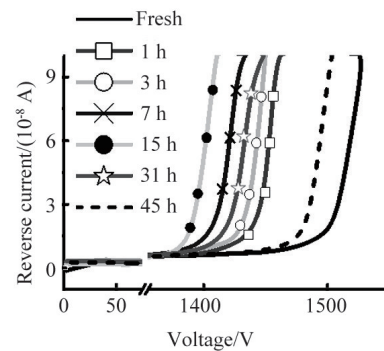
1、3、7、15、31和45 h。



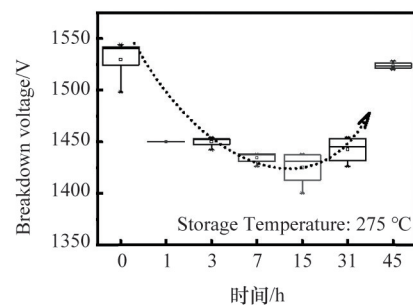
(a) 拥有FLRs终端的4H-SiC JBS器件剖面图,(b) FLRs终端横截面SiO<sub>2</sub>/4H-SiC结构的透射电子显微镜图像,(c) 待测样品照片,(d) 存储实验装置,(e) 高温存储实验程序<sup>[21]</sup>

图1 具有场限环终端的4H-SiC JBS器件

图2(a)、(b)分别展示了不同存储时间下器件的反向阻断特性及击穿电压统计结果。可以看到,器件击穿电压在高温存储应力下发生了漂移,开始时,器件击穿电压随着存储时间的增大逐渐下降,到15 h时达到最低点,约1410 V;之后,击穿电压逐渐回升,到45 h时击穿电压回升到约1520 V。



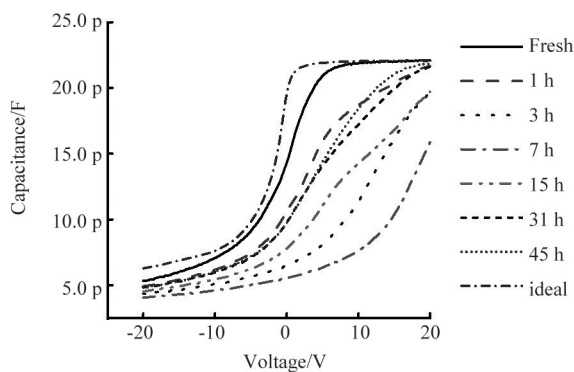
(a) SiC JBS二极管在高温存储前后的反向阻断特性



(b) 击穿电压统计结果<sup>[21]</sup>

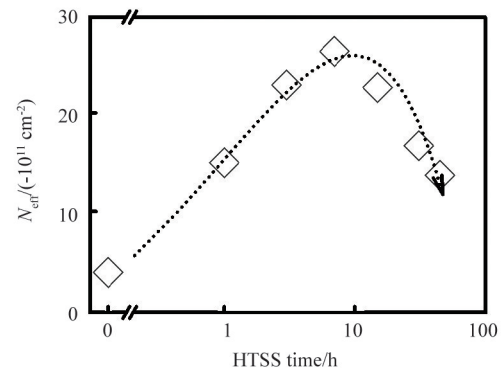
图2 不同存储时间下器件的反向阻断特性及击穿电压分布

为了进一步说明器件击穿电压漂移的原因,对同片上的MOS电容同样进行了高温测试,测试结果如图3(a)<sup>[21]</sup>所示。结果表明275℃高温存储过程中,C-V曲线逐渐向正电压方向漂移,在7 h时达到正向漂移的最大值,之后逐渐往负电压方向漂移。为了更清晰地表示C-V曲线的漂移程度,提取了



(a) 高温存储过程中,4H-SiC MOS电容在频率为100 kHz下的常温C-V曲线

MOS电容的有效界面电荷密度随高温存储应力时间的变化,如图3(b)<sup>[21]</sup>所示。结果显示,45 h,275℃高温存储过程中,SiO<sub>2</sub>/4H-SiC界面负有效电荷的数量先增大后减小。由于界面电荷的变化会影响器件FLRs终端耗尽层的扩展程度,因此会导致器件的击穿电压发生漂移。



(b) 4H-SiC MOS电容的有效界面电荷密度随高温存储应力时间的变化

图3 MOS电容高温测试结果

基于以上结果,推测了高温存储应力下界面电荷变化的物理过程(图4)。在初期,界面电荷可通过热电子发射等形式填充进SiO<sub>2</sub>/4H-SiC界面。随着SiO<sub>2</sub>/4H-SiC界面区电子俘获量的增加,耗尽宽度增大导致势垒增大,使得热离子发射电子的数量减少。另一方面,耗尽层宽度的增大同时将导致在价带边缘的累积空穴隧穿进入SiO<sub>2</sub>/4H-SiC界面,从而降低有效负界面电荷浓度,导致击穿电压重新升高。

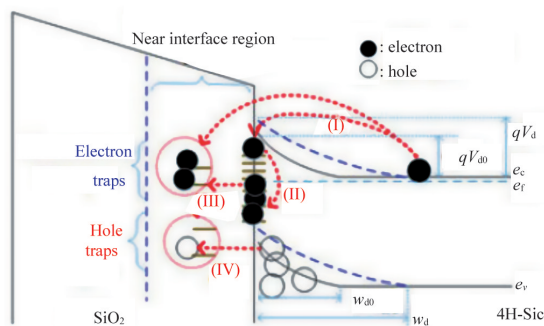


图4 高温存储应力下界面电荷变化的物理过程<sup>[21]</sup>

## 2 高压反偏

高压反偏作为一种较为常见的可靠性测试形式,常用于评估元器件在偏置应力下的稳定性。针对4H-SiC JBS器件的工作特点,对器件工作在不同反偏应力电压下的性能进行了测试分析,并推断了性能退化的内在物理机制。

图5<sup>[22]</sup>(a)显示了器件在不同反偏电压及时间下击穿电压的变化情况,可看到器件击穿电压均发生了不同程度的漂移,应力电压越大、应力时间越长,击穿电压漂移越大。这是由于在反偏应力过程中SiO<sub>2</sub>/4H-SiC界面电荷发生改变,导致器件击穿电压发生漂移。图5(b)显示了器件击穿电压的恢复情况。虽然测试结果显示器件的击穿电压在常温下均缓慢恢复,但是很难恢复到初始值。推测是由于部分被界面陷阱捕获的载流子很难在常温无外加应力的条件下释放出来,导致器件击穿电压很难恢复到初始值。

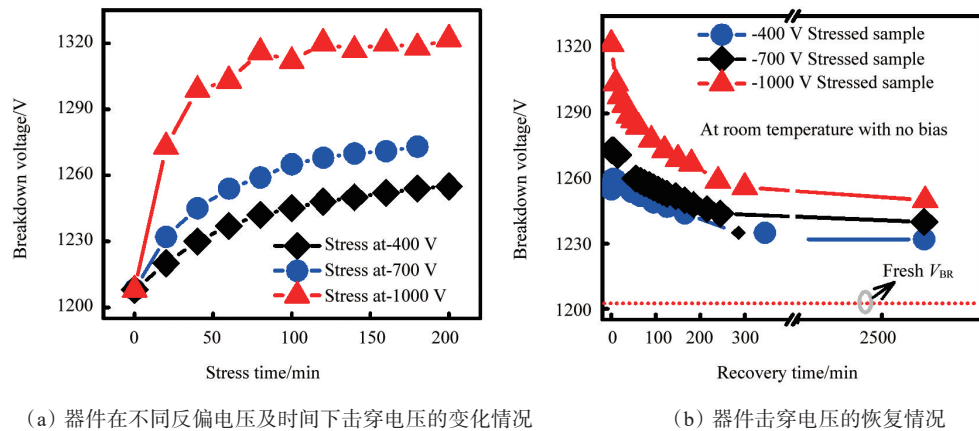


图5 4H-SiC JBS 器件击穿电压及恢复情况

基于实验结果,本课题组提出了一种可能的反偏应力下载流子被界面陷阱捕获的物理过程(图6<sup>[22]</sup>)。反向偏压应力将在 $\text{SiO}_2/\text{4H-SiC}$ 界面附近产生较高的电场和空穴浓度,这将导致空穴非常容易注入到 $\text{SiO}_2/\text{4H-SiC}$ 界面而被界面陷阱捕获。被捕获的空穴将导致 $\text{SiO}_2/\text{4H-SiC}$ 界面处的总负有效界面电荷的减少,从而器件击穿电压升高。当反向偏压应力增大时, $\text{SiO}_2/\text{4H-SiC}$ 界面上的垂直电场和空穴浓度均会增大,这将导致向 $\text{SiO}_2/\text{4H-SiC}$ 界面和氧化层注入更多的空穴,使得器件的击穿电压漂移量增大。

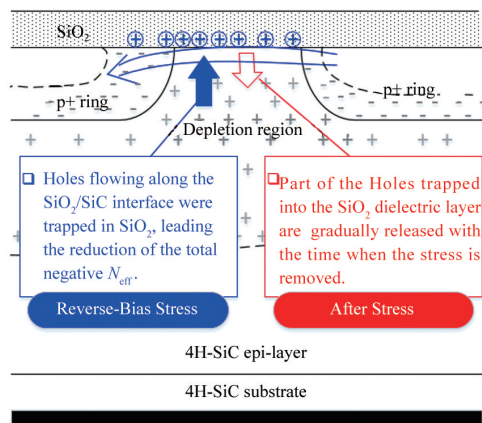


图6 高温反偏应力下界面电荷变化的物理过程

### 3 重复雪崩

重复雪崩应力可靠性测试,则主要通过器件施加多次瞬时雪崩电流来考察器件对雪崩电流应

力的耐受能力。目前,已有的研究成果表明,重复雪崩容易引起器件击穿电压漂移。基于此,对目前4H-SiC功率器件普遍采用的FLRs终端的重复雪崩可靠性问题及加固方法展开研究。

分别设计及制备了具有传统平面FLRs及具有沟槽结构的沟槽FLRs终端结构的4H-SiC JBS二极管(图7<sup>[23]</sup>)。其中,沟槽深度分别为0.5及1  $\mu\text{m}$ ,用于提升平面FLRs终端的注入结深。

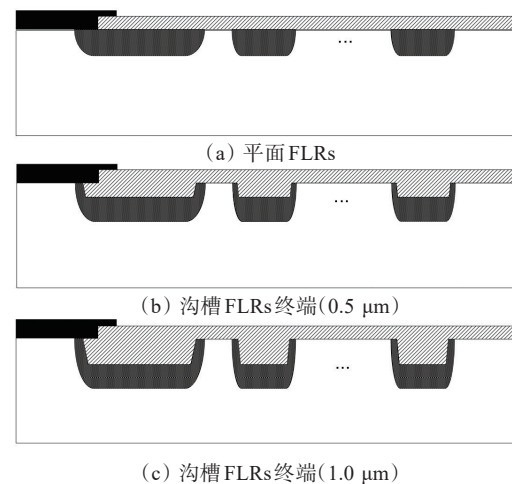


图7 不同FLRs终端结构的4H-SiC JBS二极管

图8(a)和(b)<sup>[23]</sup>显示了本次重复雪崩测试所采用的电路图及波形图,可以看到单次流经待测器件的雪崩峰值电流约1.8 A。图8(c)则显示了采用3种不同FLRs终端结构的器件在经历100万次雪崩电流脉冲后的击穿电压( $\Delta BV$ )漂移情况。3种终端结构均出现了不同程度的击穿电压漂移,首环间距

( $S_1$ )越大,器件发生击穿电压的漂移量越大。更重要的是,平面FLRs终端仅仅在 $S_1$ 为 $1.2\ \mu\text{m}$ 时才能保证击穿电压不发生漂移,而两种沟槽FLRs终端在可以保证 $S_1$ 在2及 $2.5\ \mu\text{m}$ 时击穿电压不发生漂移,且在相同 $S_1$ 下,沟槽FLRs终端的击穿电压漂移

量要小于传统平面FLRs终端结构。因此,可以看出平面FLRs终端拥有较差的器件抗重复雪崩能力,沟槽FLRs终端不仅提升了4H-SiC JBS器件的重复雪崩耐受能力,更提升了FLRs终端 $S_1$ 的工艺容限。

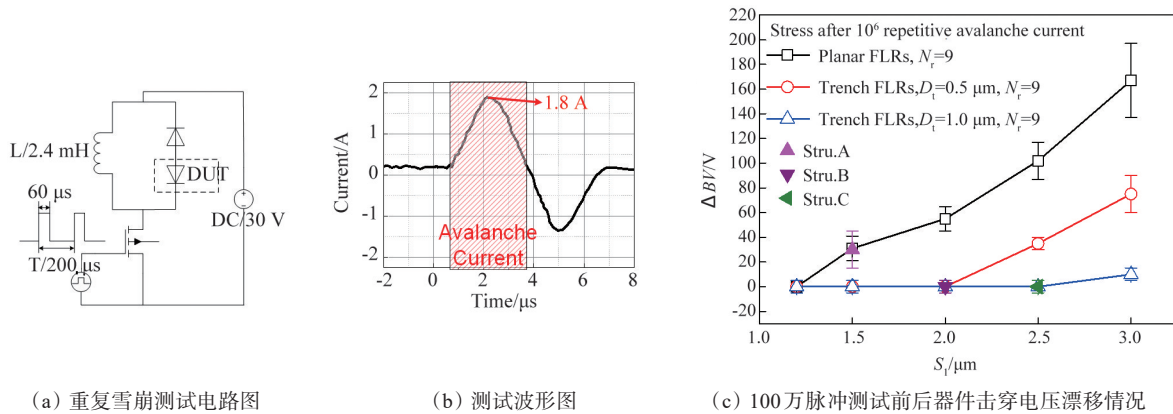


图8 重复雪崩测试

## 4 结论

随着4H-SiC功率器件在诸多领域的应用越来越广泛,器件的可靠性问题成为新的研究热点。本文介绍了本课题组在4H-SiC功率二极管的可靠性研究进展,针对高温存储、高压反偏及重复雪崩等应力所引起的器件性能退化现象,主要研究了器件退化机理,同时提出了加固方案。通过以上研究结果可知,目前4H-SiC功率器件的可靠性问题尚未完全解决,在机理分析、加固方法等方面还存在诸多问题。此外,随着4H-SiC功率器件的应用逐渐展开,4H-SiC的辐照可靠性问题也会受到广泛关注。4H-SiC器件已经展现出优良的特性,势必将进一步推动电力电子技术朝着更高效、更安全的方向发展。

### 参考文献(References)

- [1] Sugawara Y, Asano K, Saito R. 3.6 kV 4H-SiC JBS diodes with Low RonS[J]. Materials Science Forum, 2000 (338/342): 1183-1186.
- [2] Banu V, Brosselard P, Jorda X, et al. Behaviour of 1.2 kV
- [3] Zhu L, Chow T P, Jones K A, et al. Design, fabrication, and characterization of low forward drop, low leakage, 1-kV 4H-SiC JBS rectifiers[J]. IEEE Transactions on Electron Device, 2006, 53(2): 363-368.
- [4] Rabkowski J, Tolstoy G, Pefitsis D, et al. Low-loss high performance base-drive unit for SiC BJTs[J]. IEEE Transactions On Power Electronics, 2012, 27(5): 2633-2643.
- [5] Kranzer D, Reiners F, Wilhelm C, et al. System improvements of photovoltaic inverters with SiC-transistors[J]. Material Science Forum, 2010(645/648): 1171-1176.
- [6] Discrete SiC Schottky diodes[EB/OL]. [2020-05-04]. <https://www.wolfspeed.com/power/products/sic-schottky-diodes>.
- [7] CoolSiC™ Schottky diodes[EB/OL]. [2020-05-06]. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/diodes-thyristors/coolsic-schottky-diodes>.
- [8] 泰科天润[EB/OL]. [2020-07-04]. <http://www.globalpower-ertech.cn/service>.
- [9] Huang R H, Tao Y H, Cao P F, et al. Development of 10 kV 4H-SiC JBS diode with FGR termination[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(7): 074005.
- [10] Ren N, Wang J, Sheng K. Design and experimental study of 4H-SiC trench junction barrier Schottky diodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(7): 2459-2465.

SiC JBS diodes under repetitive high power stress[J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(8/9): 1444-1448.

- [11] Yuan H, Song Q W, Tang X Y, et al. High performance of 5.7 kV 4H-SiC JBSs with optimized non-uniform field limiting rings termination[J]. *Materials Science Forum*, 2016(858): 986-989.
- [12] Dou W T, Song Q W, Yuan H, et al. Design and fabrication of high performance 4H-SiC TJBS diodes[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 533: 125421.
- [13] Huang X, Wang G Y, Lee M C, et al. Reliability of 4H-SiC SBD/JBS diodes under repetitive surge current stress [C]//Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 2245-2248.
- [14] Wu J P, Ren N, Wang H Y, et al. 1.2 kV 4H-SiC merged PiN Schottky diode with improved surge current capability[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, 7(3): 1496-1504.
- [15] Xu H Y, Sun J H, Cui J J, et al. Surge capability of 1.2 kV SiC diodes with high-temperature implantation[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Piscataway, NJ: IEEE, 2018. doi: 10.1109/ECCE.2018.8634243 6.
- [16] Banu V, Godignon P, Jorda X, et al. High temperature SiC Schottky diodes with stable operation for space application[C]//CAS 2010 Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 397-400.
- [17] Godignon P, Jorda X, Vellvehi M, et al. SiC Schottky diodes for harsh environment space applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(7): 2582-2590.
- [18] Huang X, Wang G, Jiang L, et al. Ruggedness analysis of 600 V 4H-SiC JBS diodes under repetitive avalanche conditions[C]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1688-1691.
- [19] Draghici M, Rupp R, Gerlach R, et al. A new 1200 V SiC MPS diode with improved performance and ruggedness[J]. *Materials Science Forum*, 2015(821/823): 608-611.
- [20] Liu S, Yang C, Sun W, et al. Repetitive-avalanche-induced electrical parameters shift for 4H-SiC junction barrier Schottky diode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(2): 601-605.
- [21] Yang S, Zhang Y M, Song Q W, et al. Impact of high-temperature storage stressing (HTSS) on degradation of high-voltage 4H-SiC junction barrier Schottky diodes [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017(99): 1.
- [22] Song Q W, Yuan H, Sun Q J, et al. Reverse-bias stress-induced electrical parameters instability in 4H-SiC JBS diodes terminated nonequidistance FLRs[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(9): 3935-3939.
- [23] Yuan H, Liu Y C, Hu Y F, et al. Characteristic and robustness of trench floating limiting rings for 4H-SiC junction barrier Schottky rectifiers[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, 41(7): 1056-1059.

## Research progress on reliability of 4H-SiC power Schottky diodes

ZHANG Yuming, YUAN Hao, TANG Xiaoyan, SONG Qingwen, HE Yanjing, LI Dongxun, BAI Zhiqiang

School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China

**Abstract** As a wide band gap semiconductor device, the 4H-SiC power device has the advantages of high voltage, low conduction resistance and good heat dissipation due to its outstanding material features. In recent years, with the gradual commercialization of the devices, the reliability of the devices becomes a new research hotspot. This paper reviews the recent research progress of our research group on the reliability of the 4H-SiC power diodes. The degradation mechanism of the device performance is analyzed in terms of the high temperature storage and the high voltage anti bias property. According to the reliability of the avalanche, the 4H-SiC JBS diodes with the traditional FLRs and the trench FLRs terminal structure is designed and prepared. The results indicate that the trench FLRs can be used in the terminal scheme to effectively improve the capability of the device on the anti repeated avalanche .

**Keywords** 4H-SiC; diode; MOSFET ●



(责任编辑 王志敏)