

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170178

# 高速集电极沟槽绝缘栅双极晶体管

蒋梦轩<sup>1</sup> 帅智康<sup>2</sup> 沈征<sup>2</sup> 王俊<sup>2</sup> 刘道广<sup>3</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学) 重庆 400044  
2. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082  
3. 清华大学核能与新能源研究院 北京 100084)

**摘要** 在前期高速绝缘栅双极晶体管(IGBT)的基础上提出一种高速集电极沟槽绝缘栅双极晶体管(CT-IGBT)。该器件沟槽集电极与漂移区的内建电势差感应形成电子沟道而加快关断速度,且集电极沟槽具有不同于传统电场截止层(FS)的电场截止机制,并引入低浓度N型层以降低集电极沟槽对空穴注入的抑制作用。硅基材料有限元仿真结果表明,新结构CT-IGBT的关断下降时间比传统沟槽FS-IGBT少49%,且前者耐受的雪崩能量比后者高32%。因此,新结构CT-IGBT具有比FS-IGBT更优越的关断速度和强度,可应用于大功率高速电力电子系统。

**关键词:** 绝缘栅双极晶体管 电场截止 关断下降时间 雪崩能量 强度

中图分类号: TM46

## A Novel Fast Collector Trench Insulated Gate Bipolar Transistor

Jiang Mengxuan<sup>1</sup> Shuai Zhikang<sup>2</sup> Shen Zheng<sup>2</sup> Wang Jun<sup>2</sup> Liu Daoguang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology  
Chongqing University Chongqing 400044 China  
2. College of Electrical and Information Engineering Hunan University  
Changsha 410082 China  
3. Institute of Nuclear and New Energy Technology Tsinghua University  
Beijing 100084 China)

**Abstract** This paper proposes a novel collector trench insulated gate bipolar transistor (CT-IGBT) with an electron extraction channel formed on the collector side to enhance the electron extraction effect, in which a low doped n-type layer is introduced to increase hole injection efficiency at the collector side. TCAD simulation indicates that the proposed IGBT structure offers a turn-off fall time 49% lower and avalanche energy 32% higher than a conventional field-stop IGBT (FS-IGBT). Therefore, the proposed IGBT is attractive for high-speed and large-power electronic converters.

**Keywords:** Insulated gate bipolar transistor (IGBT), field stop, turn-off fall time, avalanche energy, ruggedness

## 0 引言

目前,产业化的高电压大功率绝缘栅双极晶体

国家高技术研究发展计划(2014AA052601)和中央高校基本科研业务费专项项目(106112017CDJXY150099)资助。

收稿日期 2017-02-27 改稿日期 2017-06-07

管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)普遍采用新结构设计制造技术,以ABB、三菱、东芝和日立等为代表的国际领先研发制造公司均采用了新结构设计制造技术,如软穿通技术、注入增强门极晶体管(Injection Enhanced Gate Transistor, IEGT)技术、载流子存储增强技术和平面注入增强技术等<sup>[1-4]</sup>。

近期,研发阶段的 IGBT 芯片取得了众多的研究成果。三菱公司 Masakiyo Sumitomo 等提出了高速双门极窄台面 IGBT(Double Gate Partially Narrow Mesa-IGBT, DGPNM-IGBT) 结构<sup>[5]</sup>, DGPNM-IGBT 利用栅极窄台面在栅极加正电压时形成空穴势垒以抑制空穴电流,从而达到电导调制增强的效应,同时对双门级加不同的电压来快速关断 IGBT。但极端窄的栅极窄台面在制造上增加了工艺难度;两个门极在逻辑上增大了控制难度,这严重影响了 IGBT 的产业化,东芝公司 Ryohei Gejo 等提出了理想载流子分布控制快速 IGBT<sup>[6]</sup> (Shorted Durnmy-cell IGBT, SD-IGBT), SD-IGBT 结合发射极虚短路沟槽抽取电荷原理和新型集电极空穴注入控制技术实现理想载流子的分布控制和快速关断。SD-IGBT 需要在有效的两个栅极之间增加多个抽取电荷的虚短路沟槽,因而为制造工艺带来了挑战。

此外,学者们还提出了诸多 IGBT 结构<sup>[7-10]</sup>,但在电气性能的提高和制造工艺的实现上或多或少的存在不足,使得它们目前并没有实现产业化。为此,本文在前期高速 IGBT<sup>[11]</sup>的基础上提出了一种高速集电极沟槽 IGBT。

## 1 电力电子器件设计

新结构高速集电极沟槽绝缘栅双极晶体管(Collector Trench-IGBT, CT-IGBT)的设计思想是:通过沟槽集电极与漂移区的内建电势差感应形成电子沟道,以抽取电导调制区的过量电子而加速关断,且集电极沟槽具有新的电场截止机制,其结构如图 1 所示。

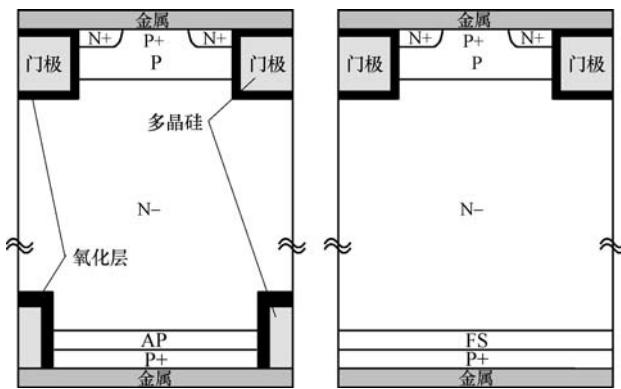


图 1 提出的 CT-IGBT 与传统沟槽 FS-IGBT

Fig.1 Proposed CT-IGBT and conventional FS-IGBT

图 1 中,新结构 CT-IGBT 在集电极增加了与正面沟槽栅极相同的沟槽结构。新结构在集电极沟槽内形成起绝缘作用的氧化层,再淀积与集电极短路

的 N 型多晶硅,从而 N 型多晶硅与漂移区之间产生内建电势差,该电势差在集电极沟槽侧墙附近累积电子形成电子沟道。该电子沟道在关断时抽取电导调制区中的过量电子而加速关断 IGBT。同时,新结构 CT-IGBT 通过集电极短路的 N 型多晶硅与漂移区间的内建电势差耗尽漂移区至临近的沟槽,并合并成复合电场以阻止在阻断模式时反偏 PN 结耗尽扩展,因而集电极沟槽截断了反偏 PN 结电场耗尽扩展。由于集电极沟槽间内建电势差的电场耗尽对集电极空穴注入有抑制作用,新结构 CT-IGBT 增加了一层低浓度的 N 型反电势层(Anti-Potential, AP)。

由此可见,新结构 CT-IGBT 与传统沟槽 FS-IGBT 的区别仅仅在于背面集电极沟槽结构,但是前者的集电极沟槽结构具有抽取过量电子和电场截止的双重机制。新结构 CT-IGBT 除了可应用于硅基电力电子器件,还可应用于碳化硅等宽禁带电力电子器件以进一步提高开关速度。

## 2 仿真结果与讨论

考虑到碳化硅等宽禁带材料物理模型的不准确性和不稳定性,本文以物理模型成熟可靠的硅基材料为研究对象,用 TCAD Silvaco 有限元仿真软件验证新结构 CT-IGBT 的设计思想。硅基物理模型包括迁移率依赖电场模型、载流子复合依赖掺杂浓度模型、禁带宽度变窄模型、碰撞电离模型和晶格加热模型等。关键参数为已公开的制造数据<sup>[1-4]</sup>,见表 1。仿真环境温度为 25°C。

表 1 IGBT 关键参数

Tab.1 IGBT key parameters

参 数	CT-IGBT	FS-IGBT
元胞尺寸/ $\mu\text{m}$	4	4
晶圆厚度/ $\mu\text{m}$	120	120
栅氧/nm	50	50
集电极栅氧/nm	100	—
集电极槽深/ $\mu\text{m}$	12	—
集电极槽宽/ $\mu\text{m}$	0.4	—
沟道长度/ $\mu\text{m}$	2	2
门极槽深/ $\mu\text{m}$	6	6
门极槽宽/ $\mu\text{m}$	2	2
漂移区浓度/ $\text{cm}^{-3}$	$5 \times 10^{13}$	$5 \times 10^{13}$
AP/FS 层浓度/ $\text{cm}^{-3}$	$1 \times 10^{16}$	$2 \times 10^{16}$
集电极浓度/ $\text{cm}^{-3}$	$5 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{17}$
电子空穴寿命/ $\mu\text{s}$	0.5	0.5

## 2.1 阻断特性

由新器件设计可知, 新结构 CT-IGBT 的电场截止机制与传统沟槽 FS-IGBT 不同。依据 IGBT 的经典理论<sup>[12]</sup>, 新结构 CT-IGBT 的空穴扩散长度  $L_a$  因受到浓度较低的 AP 层阻挡, 因而比传统沟槽 FS-IGBT 大, 且未耗尽宽度  $W_{ND}$  相同, 则新结构 CT-IGBT 的共基极放大系数  $\alpha_T$  变大。同时, 注入系数  $r$  受到新结构 CT-IGBT 集电极沟槽间内建电势差的抑制而减小, 而  $r\alpha_T$  可大可小。因此, 新结构 CT-IGBT 的击穿电压  $BV$  可高于或低于传统沟槽 FS-IGBT, 具体取决于  $\alpha_T$  和  $r$  的复合效应, 即

$$BV = BV_{pp} (1 - r\alpha_T)^{1/n} \quad (1)$$

$$\alpha_T = \operatorname{arcosh} \frac{W_{ND}}{L_a} \quad (2)$$

式中,  $BV_{pp}$  为平行平面结击穿电压;  $n$  为指数常量。

阻断特性测试结果如图 2 所示。新结构 CT-IGBT 和传统沟槽 FS-IGBT 的击穿电压在集电极电流为  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  时分别为  $1322\text{V}$ 、 $1204\text{V}$ , 前者高于后者。该结果验证了阻断原理分析, 且根据表 1 参数得出的  $\alpha_T$  和  $r$  复合效应时表现为击穿电压变大。此外, 由于空穴受到集电极沟槽间内建电势差的耗尽抑制作用, 因而新结构 CT-IGBT 的集电极电流略小。

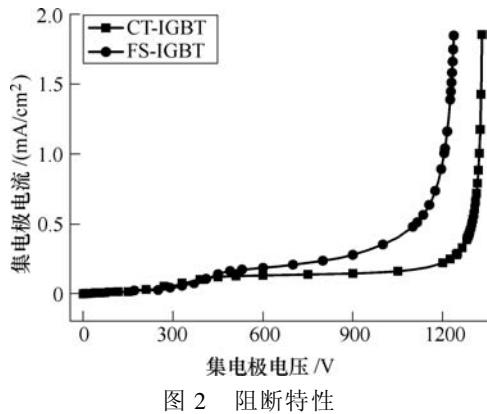


图 2 阻断特性

Fig.2 Forward-blocking characteristics

新结构 CT-IGBT 与传统沟槽 FS-IGBT 在击穿时的电场阻断特性如图 3 所示。由图 3 可知, 新结构 CT-IGBT 的集电极沟槽截止了击穿时反偏 PN 结的电场耗尽扩展, 从而验证了所提的电场阻断机制的正确性。

## 2.2 传输特性

根据阻断特性的分析, 新结构 CT-IGBT 的注入系数  $r$  受集电极沟槽间内建电势差的耗尽抑制而减小, 因而其电流密度比传统沟槽 FS-IGBT 略有降低。依据经典 IGBT 注入系数公式<sup>[13]</sup>, 可引入新结构 CT-

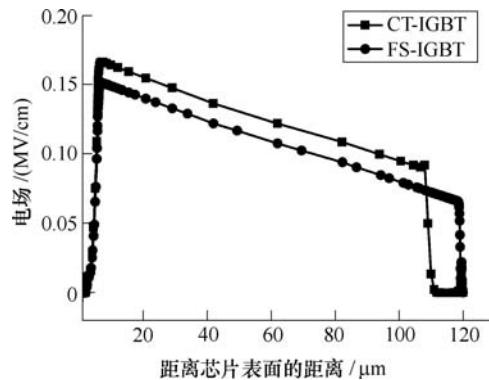


图 3 电场分布特性

Fig.3 Electric field distribution characteristics

IGBT 集电极沟槽间内建电势差近似表征该抑制效应, 即

$$r = 1 - \frac{D_E}{D_P} \cdot \frac{N_B}{N_E} \cdot \frac{W_B}{L_E} - \frac{V_{CT} - V_{DN}}{E_g} \quad (3)$$

式中,  $D_E$  为电子扩散系数;  $D_P$  为空穴扩散系数;  $N_B$  为基极掺杂浓度;  $N_E$  为射极掺杂浓度;  $W_B$  为基极宽度;  $L_E$  为射极扩散长度;  $V_{CT}$  为集电极沟槽间的最大电动势;  $V_{DN}$  为传统非穿通型 IGBT 的漂移区电动势;  $E_g$  为禁带宽度。

传输特性如图 4 所示, 测试条件均为门极电压  $15\text{V}$ 。由图可见, 当集电极电流为  $150\text{A}/\text{cm}^2$  时, 新结构 CT-IGBT 和传统沟槽 FS-IGBT 的饱和压降分别为  $1.87\text{V}$ 、 $1.82\text{V}$ , 前者略高于后者, 该结果与原理分析一致。

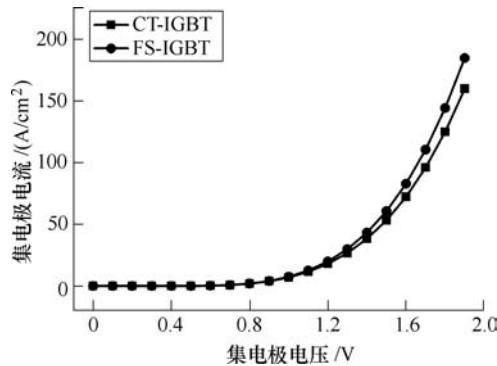


图 4 传输特性

Fig.4 Forward I-V characteristics

新结构 CT-IGBT 与传统沟槽 FS-IGBT 的电子浓度分布如图 5 所示, 其测试条件和结果截取位置为: 集电极电流  $150\text{A}/\text{cm}^2$ 、门极电压  $15\text{V}$ 、集电极深  $5\mu\text{m}$  处。由对比图可见, 新结构 CT-IGBT 的集电极沟槽确实形成了电子抽取沟道。

## 2.3 转移特性

由于新结构 CT-IGBT 和传统沟槽 FS-IGBT 具有相同的正面结构和电学参数, 因而二者阈值电压

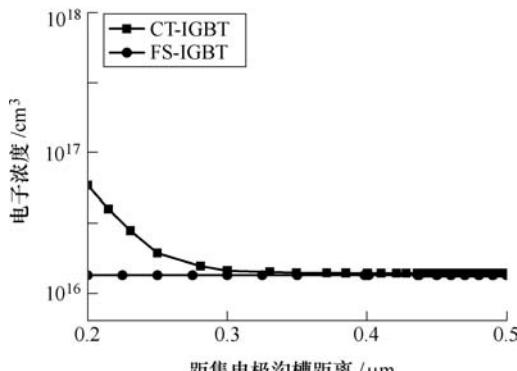


图 5 电子浓度分布

Fig.5 Electron concentration distribution

相同,且均为5.0V,转移特性如图6所示。测试条件为集电极电压1.82V。

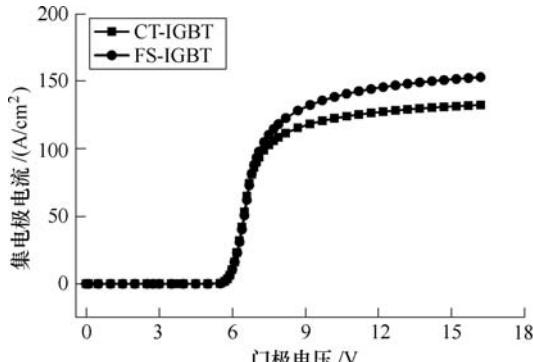


图 6 转移特性

Fig.6 Transfer characteristics

#### 2.4 关断特性

根据 IGBT 的国内和国际标准 GB/T 29332—2012/IEC 60747—9: 2007 搭建动态测试电路, 如图 7 所示。其中元器件参数为: 杂散电感 60nH、门极电阻 5Ω、门极电源±15V、高压二极管额定电压 1 200V、负载电感 5mH 和母线电压 600V。

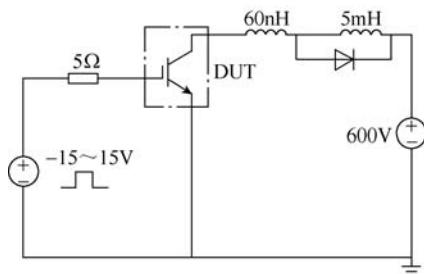


图 7 测试电路

Fig.7 Test circuit

关断波形如图 8 所示,且测试条件为: 集电极电流 150A/cm<sup>2</sup>。新结构 CT-IGBT 与传统沟槽 FS-IGBT 的关断电流下降时间分别为 79ns、154ns,前者比后者降低了 49%。其原因为在关断时集电极电子沟道抽取电导调制区中的过量电子而加速关断

IGBT,由此验证了器件设计思想。同时,新结构 CT-IGBT 的关断延时比 FS-IGBT 少 6ns,且前者的电压应力略高于后者,分别为 10 667V/μs、10 213V/μs。产生二者现象的原因是新结构 CT-IGBT 因具有略低的电流密度而降低了扩散电容。

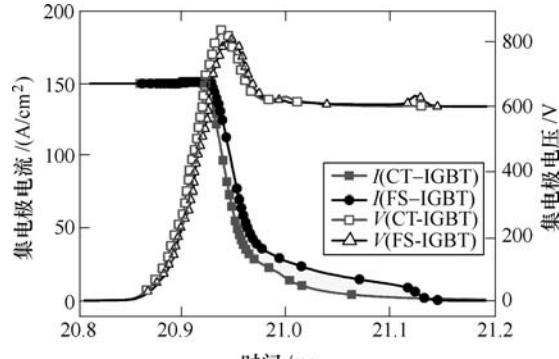


图 8 关断波形

Fig.8 Turn-off waveforms

#### 2.5 损耗特性

关断损耗是衡量 IGBT 提高饱和电压与关断损耗折中水平的重要参数。搭建图 7 所示的测试电路,改变集电极的掺杂浓度,测试电流在 150A/cm<sup>2</sup> 时的损耗特性,如图 9 所示。

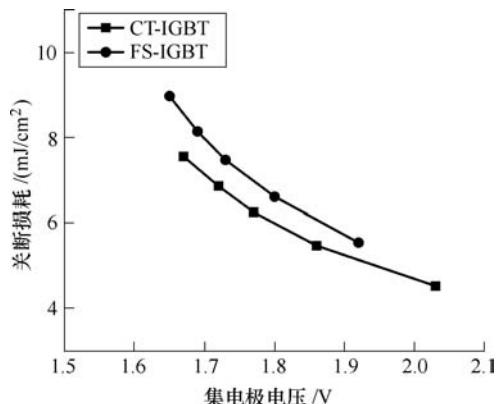


图 9 损耗特性

Fig.9 Turn-off loss characteristics

由图 9 可见,新结构 CT-IGBT 的关断损耗位于传统沟槽 FS-IGBT 的下方,前者的损耗低于后者。因此,新结构 CT-IGBT 的饱和电压与关断损耗的整体折中性能高于传统沟槽 FS-IGBT。

#### 2.6 雪崩特性

雪崩测试和短路测试是衡量 IGBT 强度的两种方式,区别于可靠性测试<sup>[14-17]</sup>,本文以雪崩测试为验证标准。搭建测试电路如图 7 所示,且略去续流二极管,测试电流为 150A/cm<sup>2</sup>,雪崩特性如图 10 所示。新结构 CT-IGBT 与传统沟槽 FS-IGBT 耐受的最大负载电感分别为 0.4mH 和 0.3mH,雪崩能量

分别为 4.5J、3.4J，前者对比后者提高了 32%。此外，在图 10 中还可观察到新结构 CT-IGBT 的过冲电压比传统沟槽 FS-IGBT 高，其原因在于前者的负载电感较大。

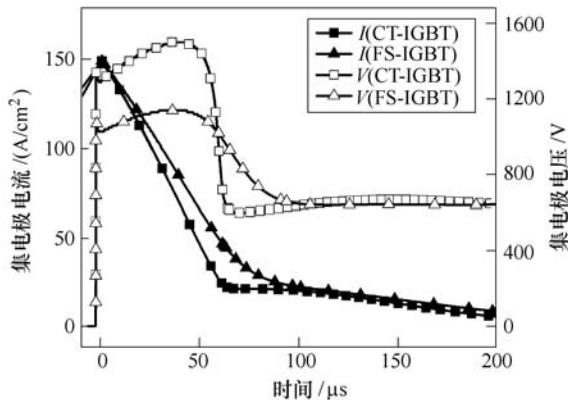


图 10 雪崩特性

Fig.10 Unclamped inductive switching characteristics

### 3 结论

本文提出了一种高速集电极沟槽结构 IGBT。新结构 CT-IGBT 利用槽集电极与漂移区的内建电势差感应形成电子沟道的原理，抽取电导调制区的过量电子而加速关断。同时，新结构 CT-IGBT 利用集电极沟槽的电场截止机制增强器件的强度。对比传统沟槽 FS-IGBT，新结构 CT-IGBT 的关断下降时间下降了 49%，以及耐受的雪崩能量提高了 32% 并保持近似的击穿电压、阈值电压、饱和压降，但是需要额外的集电极沟槽制造工艺。尽管增加了制造的复杂性，然而该集电极沟槽制造工艺与正面栅极结构类似，在一定程度上降低了制造难度。因此，新结构 CT-IGBT 对比 FS-IGBT 具有更优越的电气性能，以及更适用于大功率高速系统的需求。

### 参考文献

- [1] Laska T, Munzer M, Pfirsch F, et al. The field-stop IGBT (FS IGBT)—a new power device concept with a great improvement potential[C]//IEEE Proceedings of 12th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Toulouse, France, 2000: 355-358.
- [2] Nakamura K, Kusunoki S, Nakamura H, et al. Advanced wide cell pitch CSTBTs having light punch-through (LPT) structure[C]//IEEE Proceedings of 14th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Santa Fe, USA, 2002: 277-280.
- [3] Takahashi H, Yamamoto A, Aono S, et al. 1200V reverse conduction IGBT[C]//IEEE Proceedings of 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Kitakyushu, Japan, 2004: 133-136.
- [4] Mori M, Oyama K, Arai T, et al. A planar gate high-conductivity IGBT (HiGT) with hole barrier layer[J]. IEEE Transactions on Electronic Devices, 2007, 54(6): 1515-1520.
- [5] Sumitomo M, Sakane H, Arakawa K, et al. Injection control technique for high speed switching with a double gate PNM-IGBT[C]//IEEE Proceedings of 25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Kanazawa, Japan, 2013: 33-36.
- [6] Gejo R, Ogura T, Nakamura K, et al. Ideal carrier profile control for high-speed switching of 1200V IGBTs[C]//IEEE Proceedings of 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Waikoloa, USA, 2014: 99-102.
- [7] Suekawa E, Tomomatsu Y, Enjoji T, et al. High voltage IGBT (HV-IGBT) having P+/P- collector region[C]//IEEE Proceedings of 10th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Kyoto, Japan, 1998: 249-252.
- [8] Tu S L, Tam G, Tam P, et al. Analysis of direct wafer bond IGBTs with heavily doped n+ buffer layer[C]//IEEE Proceedings of 8th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Maui, USA, 1996: 339-342.
- [9] Huang S, Sheng K, Udrea F, et al. A dynamic N-buffer insulated gate bipolar transistor[J]. Solid State Electronics, 2001, 45(1): 173-182.
- [10] Antoniou M, Udrea F, Bauer F, et al. The soft punchthrough+superjunction insulated gate bipolar transistor: a high speed structure with enhanced electron injection[J]. IEEE Transaction on Electronic Devices, 2011, 58(3): 769-775.
- [11] Jiang Mengxuan, Yin X, Shuai Z, et al. An insulated-gate bipolar transistor with a collector trench electron extraction channel[J]. IEEE Electronic Device Letters, 2015, 36(9): 935-937.
- [12] Baliga B J. Fundamentals of power semiconductor

- devices[M]. New York: Springer, 2008.
- [13] Khanna V K. The insulated gate bipolar transistor theory and design[M]. New York: John Wiley and Sons, 2003.
- [14] 赖伟, 陈民铀, 冉立, 等. 老化实验条件下的 IGBT 寿命预测模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 173-180.  
Lai Wei, Chen Minyou, Ran Li, et al. IGBT lifetime model based on aging experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 173-180.
- [15] 杜雄, 李高显, 刘洪纪, 等. 风速概率分布对风电机变流器中功率器件寿命的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 109-117.  
Du Xiong, Li Gaoxian, Liu Hongji, et al. Effect of wind speed probability distribution on lifetime of power semiconductors in the wind power converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 109-117.
- [16] 陈民铀, 高兵, 杨帆, 等. 基于电-热-机械应力多物理场的 IGBT 焊料层健康状态研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 252-260.
- Chen Minyou, Gao Bing, Yang Fan, et al. Healthy evaluation on IGBT solder based on electro-thermal-mechanical analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 252-260.
- [17] 李学生, 张新闻, 常玉峰, 等. 基于半导体功率损耗的小型风电变换器可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 15-21.  
Li Xuesheng, Zhang Xinwen, Chang Yufeng, et al. Small wind power converter reliability research based on semiconductor power loss[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 15-21.

#### 作者简介

蒋梦轩 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子器件、封装及其电力电子系统应用。

E-mail: 250151391@qq.com (通信作者)

帅智康 男, 1982 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进电能质量控制技术、电力电子技术及应用、微网稳定性分析及控制等。

E-mail: johnshen@ieee.org

(编辑 陈 诚)