

电动汽车 IGBT 芯片技术综述和展望

罗皓泽¹, 高洪艺¹, 朱春林², 李武华¹, 何湘宁¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;
2. 株洲中车时代半导体有限公司, 湖南省 株洲市 412001)

Review and Prospect of IGBT Chip Technologies for Electric Vehicles

LUO Haoze¹, GAO Hongyi¹, ZHU Chunlin², LI Wuhua¹, HE Xiangning¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Company Limited, Zhuzhou 412001, Hunan Province, China)

ABSTRACT: As a core device of electric vehicle powertrain system, insulated gate bipolar transistor (IGBT) determines the safety and reliability of electric vehicle. The chip structure is the key factor to determining the performance of the IGBT chip. Therefore, the optimized design of the chip body is the basis for improving the power density, operating efficiency and adaptability of the operating conditions of the electric vehicle traction inverter. This article focused on the latest developments in key technologies such as trench gate technology, shielding gate structure, carrier storage layer, super junction and reverse conduction technology for domestic and foreign researches on the improvement of current density and power loss of electric vehicle IGBT chips. The reliability improvement technology of IGBT chips under complex working conditions such as high temperature or high pressure was summarized, especially the optimized design of buffer layer and terminal structure. The article also focused on the multi-functional integrated integration technology of IGBT devices, including on-chip integrated temperature or current sensor technology and integrated non-destructive buffer circuit inside the module. On this basis, combined with the development trend of electric vehicles, the future research direction of electric vehicle IGBT chip technology was prospected.

KEY WORDS: micro pattern trench gate technology; dummy trench; high temperature technology; intelligent integration

摘要: 绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)作为电动汽车动力总成系统的核心器件,直接决定了

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51925702); 国家自然科学基金项目(51677166)。

The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51925702); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51677166).

电动汽车的安全性和可靠性。芯片结构是决定 IGBT 芯片性能的关键因素。因此,芯片本体的优化设计是提高电动汽车牵引逆变器功率密度、运行效率和工况适应性的基础。围绕电动汽车 IGBT 芯片电流密度提升和功率损耗降低方面的国内外研究,分类探讨沟槽栅技术、屏蔽栅结构、载流子存储层、超级结和逆导技术等关键技术的最新进展;梳理了 IGBT 芯片在高压/高温等复杂工况下的可靠性提升技术,特别是对缓冲层和终端结构的优化设计进行了总结和归纳。此外,还着重探讨了 IGBT 器件的多功能一体化集成技术,包括片上集成温度/电流等传感器技术和模块内部集成无损缓冲电路等。在此基础上,结合电动汽车的发展趋势,展望了电动汽车 IGBT 芯片技术的未来研究方向。

关键词: 精细化沟槽栅技术; 虚拟陪栅技术; 高温技术; 智能化集成

0 引言

随着全球变暖和环境污染的加剧,以及为缓解日益严峻的节能减排压力,欧洲多国先后宣布全面禁售燃油车时间表,中国也计划将于 2050 年前实现传统燃油车的全面退出^[1-2]。目前,世界主要发达国家都相继发布和实施新的电动汽车发展战略,使汽车动力电气化成为汽车史上最大的变革^[3]。

截至 2019 年底,全国新能源汽车保有量达到 381 万辆,相比 2018 年增长 46.05%,其中纯电动汽车保有量达 310 万辆,占比 80%以上^[4-5]。随着电动汽车市场份额的不断扩大,车辆电动化会在交通方式的演变过程中起主导作用。同时,我国对电动汽车行业持续出台政策扶持,以及汽车产业在电动汽车业务上的扩大投入都表明:车辆电动化趋势在未来很长一段时间内将保持强劲的增长态势^[6]。

牵引逆变器是电动汽车动力总成系统的核心能源转换单元,将动力电池输出的直流电逆变为三

相交流电驱动电机, 同时在车辆制动时实现能量回馈。车辆的频繁启停导致逆变器中的功率半导体器件需要承受大幅温度波动或机械振动带来的应力冲击^[7]。为保障电动汽车的安全可靠运行, 逆变器须在能够应对高功率、大电流等极限工况和电磁兼容性挑战的同时^[8], 还需兼顾使用寿命、可靠性及成本要求^[9]。

复杂、多变的运行工况(例如路面不平、坡道以及高温、高湿等环境)以及大众消费特点要求电动汽车需具备动力强、效率高和安全可靠等 3 种属性。牵引逆变器的功率密度直接决定了电动汽车的动力输出能力, 由于牵引逆变器体积和母线电压等级的限制, 当前实现高功率密度均着眼于逆变器中功率半导体器件电流密度的提高。此外, 电动汽车续航能力的提升一方面需通过功率半导体器件的低功率损耗优化技术来提高牵引逆变器的能量转换效率; 另一方面, 通过提高动力电池的电压等级实现充电效率的提升, 这对功率半导体器件耐压等级提出了更高要求; 同时, 高温漏电流会使芯片热可靠性急剧下降^[10], 甚至导致功率半导体器件损坏, 引发逆变器二次烧毁; 而保障高温工况下牵引逆变器的安全可靠运行一方面要求功率半导体模块封装具有良好的散热能力; 另一方面, 要求通过功率半导体结构优化技术, 提高其耐高温能力。最后, 电动汽车直接关系人身安全, 牵引逆变器的安全、可靠运行离不开传感器对其运行状态的精准监控以及辅助电路的保护作用, 将传感器或驱动/缓冲电路集成在功率半导体器件上或功率模块内部, 有利于进一步提高牵引逆变器的功率密度。

目前, 可用于车规级功率模块的功率半导体器件, 包括碳化硅基功率金属氧化物半导体场效应晶体管(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)和硅基 IGBT。

虽然碳化硅(silicon carbide, SiC)器件具有大功率、耐高温、损耗低及开关速度快等优势^[11-14]; 但其成本高, 动态特性对封装杂感参数敏感^[15], 缺少长期运行可靠性评估, 并且微管缺陷(micropipe defect, MPD)、Bazel 平面缺陷(Bazel plane defect, BPD)等主要材料问题和栅极氧化层的工艺可靠性有待解决^[16-17]。同时, 由于当前工艺限制, 单个碳化硅芯片面积小, 载流能力远低于硅基 IGBT 芯片, 因此需更多芯片并联使用, 而实现多个芯片间的均流以及低热耦合是碳化硅逆变器设计中亟需解决的问题。此外, 传统的封装形式杂散电感大, 封装

材料耐温低, 限制了碳化硅器件发挥其开关速度快和耐温高的优势^[15,18]。以上因素均在一定程度上制约了碳化硅器件在电动汽车领域的广泛应用。目前, 市面上特斯拉的部分车型中已使用碳化硅器件, 减轻了整车重量, 且增加了续航里程。因此, 可以预见, 碳化硅器件今后将会和硅基器件长期并存互补, 共同成为电动汽车领域的主流选择, 推动牵引逆变器向高功率密度、高效率等方向前进。

鉴于车规级功率模块的应用场景需求分析, 硅基 IGBT 芯片仍是电动汽车逆变器应用上的主流功率器件, 且极具发展潜力, 其芯片技术演进历程如图 1 所示。本文重点就电动汽车 IGBT 芯片大电流密度、低损耗优化技术, 高压/高温技术和智能集成技术 3 个关键优化方向对电动汽车 IGBT 芯片技术进行梳理总结, 并在此基础上展望电动汽车 IGBT 芯片技术的发展方向。

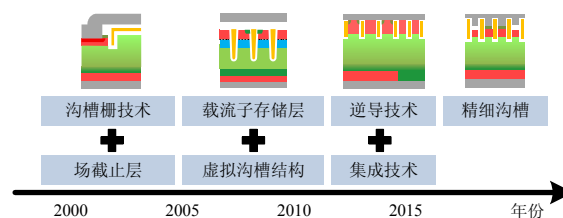


图 1 电动汽车 IGBT 芯片技术发展历程

Fig. 1 Development of IGBT chip technology for electric vehicles

1 车规级芯片大电流密度、低损耗技术

目前, 为满足电动汽车的功率需求, 牵引逆变器中一般使用多芯片并联的功率模块。然而, 多芯片并联会带来并联芯片间电流分布不均, 回路杂散电感增大和散热效率下降等问题; 同时, 受到封装尺寸的限制, 现有技术下标准模块的功率很难得到有效地提升。因此, 亟需通过提高单个芯片的电流密度, 来实现模块功率密度以及模块电、热性能的综合提升。

1.1 沟槽栅技术

相比于平面栅结构, 沟槽栅技术由于消除了结型场效应管(junction gate field-effect transistor, JEFT)区域, 具有元胞紧凑和通态压降小的特点, 可以实现更大的电流密度, 因此被广泛用于电动汽车芯片领域^[19], 如图 2 所示。

Nakagawa 在 2006 年 ISPSD 会议上讨论了台面宽度(即沟槽间距, mesa)对 IGBT 芯片 V-I 曲线的影响, 指出在一定范围内, 通过减小台面宽度, 提高电子注入效率, 可以提升 IGBT 芯片在相同导通电

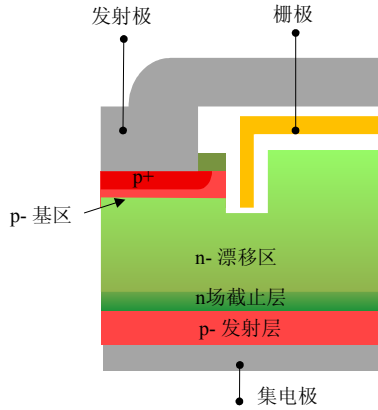


图2 沟槽栅结构

Fig. 2 Structure of trench gate

压下的电流密度^[20], 如图3所示。

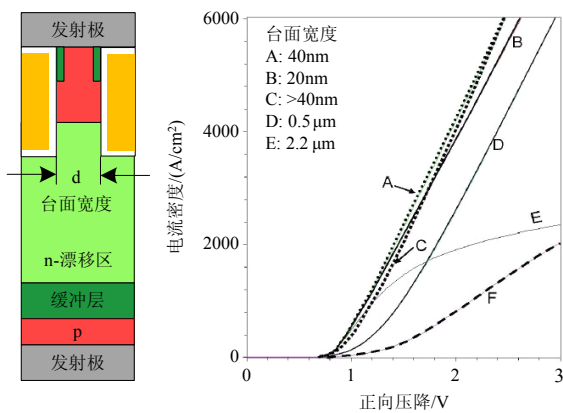


图3 V-I 曲线与台面宽度 d 的关系

Fig. 3 V-I curves of 600V IGBT with mesa width as a parameter

英飞凌公司于 2000 年推出了采用沟槽栅技术的 IGBT3, 后续主要通过调整沟槽栅间距来实现芯片迭代优化设计, 如图 4 所示。相比于传统沟槽栅结构, TRENCHSTOP™ 5 栅极结构更加紧凑, 导电沟道宽度显著提高, 导通损耗减小 10%。在此基础上, 英飞凌公司于 2016 年开发出适合电动汽车应用的 750V EDT2 芯片, 使用精细化沟槽技术(micro pattern trench, MPT)降低沟槽栅间距至亚微米级, 约 600nm, 并采用了虚拟陪栅结构和非有源区以提高元胞通态时发射极端载流子浓度^[21], 电流密度达 275A/cm², 如图 5 所示。因此, 相比于 IGBT3, EDT2 的通态饱和压降在 25℃和 150℃下分别减小了 14% 和 20%^[22]。MPT 沟槽组成多样, 如图 6 所示, 其中虚拟陪栅结构可以通过接地或接有源栅极的方式调节芯片的 C_{gd} 和 C_{gs}, 因此, EDT2 可使用较大的栅极电阻实现与 IGBT3 相同的开关速度, 即其栅极电阻调节范围大, 开关可控性高, 有利于抑制电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)。但 EDT2 的不足在于, 相比于 IGBT3 在 150℃下 6μs 的短路

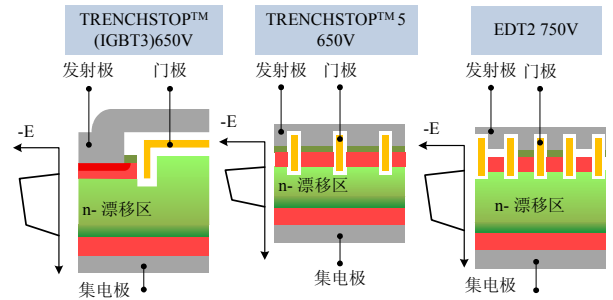


图4 3 种类型英飞凌 IGBT 结构示意图

Fig. 4 Three types of Infineon IGBT structure

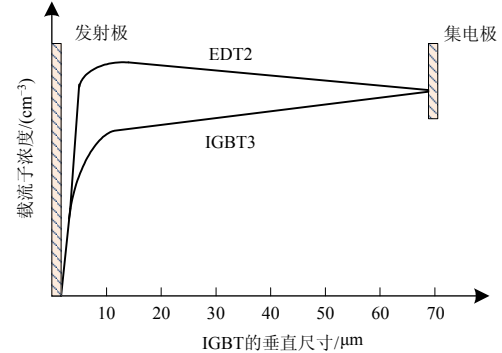


图5 EDT2 与 IGBT3 载流子浓度分布对比

Fig. 5 Comparison of carrier density within EDT2 and IGBT3

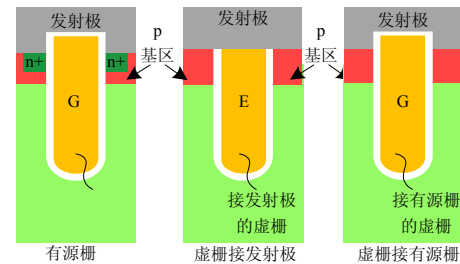


图6 MPT-IGBT 元胞结构组成部分

Fig. 6 Building blocks for MPT-IGBT cell structure

耐受时间, 沟道宽度的调整造成其短路耐受时间降至 4μs^[22]。

为进一步确保电动汽车 IGBT 芯片安全可靠运行, 通过减小台面宽度提高芯片电流密度时, 还需要考虑如何避免闩锁效应。中车时代电气于 2017 年研制出车规级沟槽栅 IGBT 芯片, 随后在此基础上提出了如图 7 所示的沟槽结构, 在 2 个有源沟槽栅之间增加直接与发射极连接的沟槽, 即嵌入式沟槽发射极(recessed emitter trench, RET)结构。在 IGBT 芯片导通时, RET 结构可通过为空穴提供额外的流动路径, 如图 8 所示, 减小 n+发射极下空穴流动的数量, 使芯片在大电流下也难触发闩锁^[23-24]。可将沟槽台面宽度降至 1.2μm, 实现在相同关断损耗下芯片通态压降低 17.5%, 且电流密度可对标英飞凌的 EDT2 芯片; 同时, 引入浮动的虚拟陪栅结构, 增强芯片的 di/dt 可控性。在此基础上,

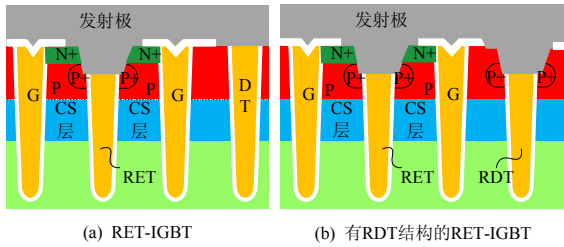


图 7 RET/RDT IGBT 元胞结构示意图

Fig. 7 Structure of RET/RDT IGBT cell

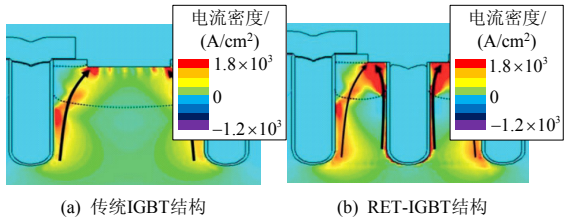


图 8 IGBT 芯片导通时空穴电流密度分布

Fig. 8 Hole current density distribution when IGBT is turned on

嵌入式沟槽陪栅结构(recessed dummy trench, RDT)IGBT 芯片将虚拟陪栅结构连接至发射极, 减小密勒电容, 以提高 IGBT 开通 di/dt , 从而实现在电动汽车应用工况下开通损耗降低 27%^[25-26]。

类似地, 日本瑞萨电子公司在电动汽车 IGBT 芯片元胞优化上采用了非均匀间距的沟槽结构, 有源区与发射极区通过宽 p 区隔离, 通过调节此区宽度与有源区的宽度比, 来优化芯片的电流密度和短路电流能力之间的折衷关系^[27-28]。

图 9 显示了沟槽栅技术需在电流密度、短路耐量和开关损耗 3 个方面做折衷设计考虑。电动汽车 IGBT 芯片通过增加有源沟槽的数目或采用沟槽精细化技术均可以有效提高电流密度, 同时结合非有源沟槽结构占比的调整, 优化电流密度与短路耐量之间的折衷关系。引入虚拟陪栅结构可以减小芯片的密勒电容, 从而降低开关损耗, 但是需要考虑其连接方式对芯片短路耐量和开关损耗之间折衷关

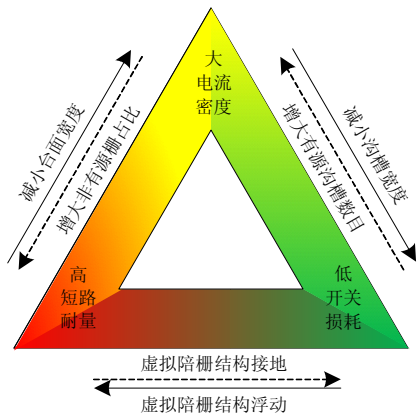


图 9 沟槽栅优化折衷图

Fig. 9 Design trade-off of trench gate

系的影响: 虚拟陪栅结构接地可提高 di/dt , 但是牺牲了外部驱动电阻对 di/dt 的可控性; 而采用浮动的虚拟陪栅结构可提高芯片 di/dt 的可控性, 减小芯片短路时的浪涌电流峰值, 提高短路耐量^[19]。

1.2 屏蔽栅技术

仅通过增加沟槽栅数目或减小台面宽度提高 IGBT 芯片的电流密度, 会同时增大栅极与集电极的正对面积, 导致 IGBT 芯片的密勒电容变大, 从而引起 IGBT 芯片开关速度减慢和损耗增大的问题。为解决上述问题, 富士公司提出了沟槽分离(split gate)和屏蔽沟槽栅技术(trench shield gate)。图 10 给出沟槽分离结构, 其使用 SiO₂ 将沟槽从中间分离, 并连接非有源区与发射极, 用以减小栅极与集电极的正对面积。相比于传统沟槽结构, 该结构实现了密勒电容降至 1/10, 继而开通损耗降低 10%; 同时, 通过浮动 p 体区, 提高注入效应, 使通态压降降低了 13%^[29]。屏蔽沟槽栅技术与分离沟槽结构原理类似, 如图 11 所示, 区别在于无需添加氧化物来分离沟槽, 简化了制造工艺, 并且相比于无屏蔽沟槽结构的 IGBT, 开通损耗降低 26%^[30]。

香港科技大学和日立公司分别提出了 Fin-p-body IGBT^[31]和 Side Gate HiGT^[32]结构, 如图 12、13 所示, 两者原理类似, 即通过减小栅极与集电极

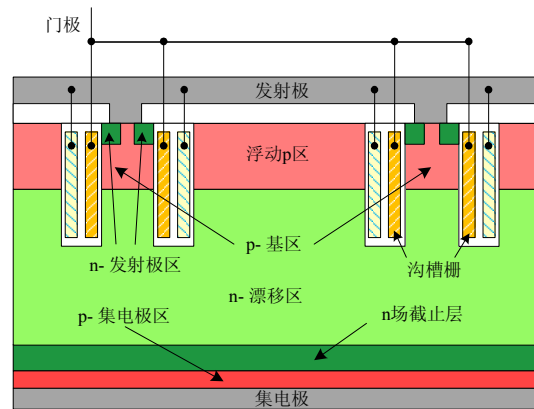


图 10 分离沟槽栅横截面示意图

Fig. 10 Structure of split gate

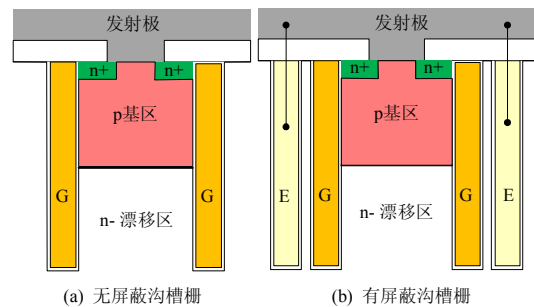


图 11 无/有屏蔽沟槽栅的元胞结构示意图

Fig. 11 Structure of cell without/with shield trench

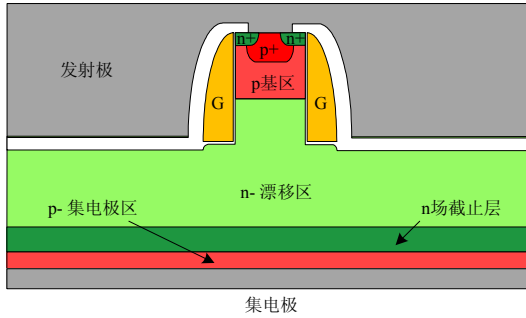


图 12 Fin-p-body IGBT 元胞结构示意图

Fig. 12 Structure of Fin-p-body IGBT cell

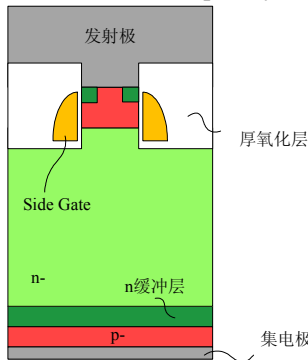


图 13 Side Gate HiGT 元胞结构示意图

Fig. 13 Structure of Side Gate HiGT

的正对面积,使 IGBT 芯片的密勒电容相比于传统沟槽结构减小 60%以上,并通过去除浮动 p 体区域,提高 IGBT 芯片 di/dt 的可控性,可有效抑制 EMI^[33]。

1.3 载流子存储层技术

目前,沟槽栅制造工艺,例如光刻机的最小线宽和对准能力,是 IGBT 芯片台面宽度进一步下降的瓶颈,因此实现 IGBT 芯片电流密度的提升和功率损耗的下降还需要结合载流子存储技术,使 IGBT 芯片中载流子分布更接近最优状态^[34]。

传统 IGBT 芯片的载流子浓度从背面集电极到正面发射极递减,正面发射极的低载流子浓度限制了通态压降的降低^[35]。因此,三菱公司针对电动汽车应用领域提出载流子存储沟槽栅双极晶体管(carrier stored trench-gate bipolar transistor, CSTBT)芯片结构,如图 14 所示,已于 2012 年迭代至第七代^[36]。该结构在利用精细化沟槽技术提高 IGBT 芯片电流密度的基础上^[36-38],通过添加载流子存储层(carrier stored layer, CS layer)阻止空穴进入 p 基区,以提高近发射极处的空穴浓度,实现通态电压减小至少 20%^[39]。同时,由于各元胞的导通阈值电压 $V_{ge(th)}$ 与沟道和 CS 层掺杂浓度有关,因此该工艺的难点在于,如何弱化形成 CS 层时对各元胞 $V_{ge(th)}$ 一致性的影响。得益于采用高能注入技术形成 CS 层,相比于热扩散技术,其减小了 CS 层形成时对沟槽掺杂浓度

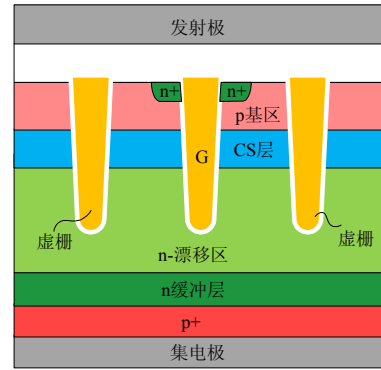


图 14 CSTBT 元胞结构示意图

Fig. 14 Structure of CSTBT cell

的影响,进而提高 $V_{ge(th)}$ 的一致性,改善了 IGBT 芯片通态时各元胞的均流效果,如图 15 所示^[36]。

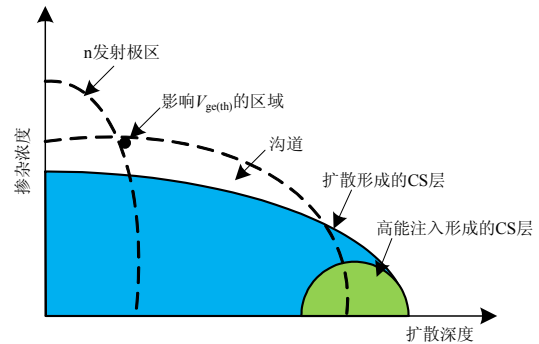
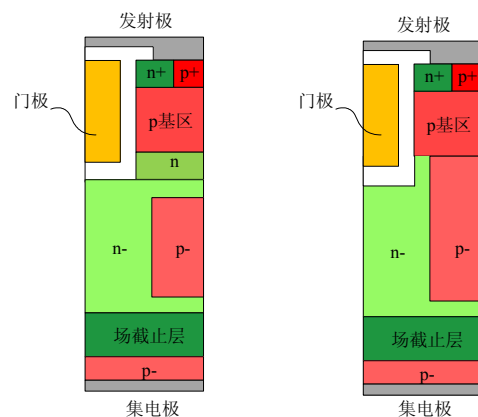


图 15 高能注入技术形成的杂质分布

Fig. 15 Impurity profile formed by high-energy implantation technology

1.4 超级结技术和逆导 IGBT 技术

超级结概念打破了传统硅器件导通压降与耐压间的极限关系,在 MOSFET 中已经成功实现了大规模应用。目前,已有将超级结概念应用到中低压等级车规级 IGBT 芯片的相关研究,用以更进一步地降低芯片的损耗,如图 16 所示,其通过调整超级结 p 柱的掺杂浓度和几何结构,可以实现 200°C 下关断损耗和通态电压折衷关系的优化^[40]。



(a) p柱与p体区分离的结构 (b) p柱与p体区相连且无n增强层结构

图 16 超级结场截止 IGBT 元胞结构示意图

Fig. 16 Structures of super junction field stop IGBT cell

逆导型 IGBT(reverse conducting IGBT, RC-IGBT)在传统 IGBT 芯片的集电极局部引入 n+ 区, 与 n-漂移区和 p 基区形成 p-i-n 二极管, 如图 17 所示^[41]。在同一芯片上将 IGBT 和二极管反并联; 芯片面积的减小使封装更加方便, 同时节省了焊接芯片和键合绑定线的成本, 具有更大的成本优势。此外, RC-IGBT 散热面积大, 允许的工作结温更高^[42], 极大提高了单个芯片的功率密度。富士公司已经成功将其第七代 RC-IGBT 用于 1200A/

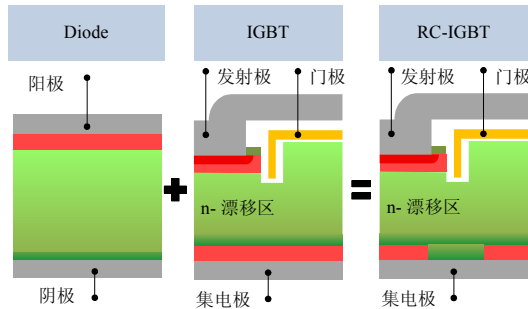


图 17 逆导 IGBT 元胞结构示意图
Fig. 17 Structure of RC-IGBT cell

750V 电动汽车功率模块^[43]。

但是, 目前 RC-IGBT 芯片存在电压回跳现象, 且由于反向恢复特性差和成品率较低等因素还未实现广泛应用^[44]。

由表 1 可知, 上述优化方式和新型结构一般只针对单一目标, 因此实现电动汽车 IGBT 芯片在大电流密度的基础上兼顾低损耗, 则需要考虑多种优化技术的有机组合。沟槽栅技术是提高电动汽车 IGBT 芯片电流密度、减小功率损耗的主要实现途径。其中, 减小台面宽度是主要的优化方式, 当前 IGBT 芯片台面宽度远大于硅 IGBT 的理论极限 (20~40nm)^[20], 因此减小台面宽度这一优化趋势目前不会改变。在此基础上, 结合虚拟陪栅结构、屏蔽栅结构和载流子存储层设计来降低通态压降和密勒电容, 实现功率损耗降低。随着电动汽车对 IGBT 芯片功率密度、成本和结温要求的进一步提高, 以及芯片设计、制造等核心技术的突破, 超级结 IGBT 和逆导 IGBT 将会成为未来重点研究方向。

表 1 大电流密度、低损耗优化技术汇总

Tab. 1 High current density and low loss optimization summary

优化技术	原理	比较指标			不足	典型应用案例	参考文献
		电流密度	通态损耗	关断损耗			
沟槽栅技术	提高增强注入效应	↑	↑	↓	需考虑窄台面宽度对器件短路能力的影响, 且对制造工艺要求高	英飞凌 HybridPACK Drive 中车 Six-pack S3+模块	文献[19-28]
屏蔽栅技术	通过减小栅极与集电极的正对面积降低密勒电容	↓	-	↑	太小的密勒电容对造成反向恢复时过大的 dV/dt , 引起 EMI 问题	日立车规级模块 MBB400TX12A	文献[29-33, 37]
载流子存储层	提高增强注入效应	-	↑	-	需考虑对各元胞 $V_{ge(th)}$ 一致性的影响	三菱 J1 系列模块	文献[35-39]
超级结技术	超级结技术	-	↑	-	目前处于研究阶段	暂无	文献[40]
逆导技术	同一芯片上集成 IGBT 和 FWD	-	-	↑	有电压回跳问题, 且成品率低	富士 M653 系列车规级模块	文献[41-44]

注: 正面影响: ↑; 无影响: -; 负面影响: ↓。

2 车规级芯片高压/高温技术

电动汽车牵引逆变器的过载运行会使 IGBT 芯片承受过电压和高温, 可采用高压/高温技术对 IGBT 芯片体结构进行优化。

2.1 缓冲层技术

芯片减薄是实现通态压降和关断损耗折衷关系优化和成本降低的重要途径, 有助于提升电动汽车的效率和功率密度, 也是当前芯片的发展趋势。但是芯片厚度的减小也会带来耐压裕量下降的问题, 因此需要添加缓冲层改变电场分布, 实现芯片

耐压等级提高。当前, 场截止型(field stop, FS) IGBT^[45]占据电动汽车 IGBT 芯片应用主流, 其缓冲层的优化主要着眼于掺杂性质的改进, 以实现芯片耐压能力的提高, 以及高温漏电流的降低和芯片运行允许结温的增大^[46-47]。

英飞凌公司对 600V IGBT 芯片的场截止层中掺入一种深能级杂质(例如硒或硫), 其在高温下释放出更多的电子, 减小阳极电流增益 α_{pnp} , 从而降低高温下漏电流^[10]。

此外, 为进一步避免芯片变薄对耐压能力的影

响,同时顺应电动汽车动力电池电压提高的趋势。电动汽车 IGBT 芯片还可借鉴高压 IGBT 芯片中应用的缓冲层双掺杂浓度峰值技术^[48]等。

2.2 终端结构优化

终端结构主要通过缓解端面处的电场集中效应,实现增大器件击穿电压和提高可靠性的目的。目前,电动汽车用中低压器件普遍采用场限环(field limiting rings, FLRs)与场板(field plates, FPs)相结合的终端结构,如图 18 所示。这种终端技术制造工艺简单,且一般通过增大场限环个数、宽度以及场板的长度,即可提高器件耐压能力;但是由于器件耐压能力与环数、环宽和场板长度之间存在非线性关系,因此如何选择合适的环宽、个数及场板的长度是一大技术难点^[49]。

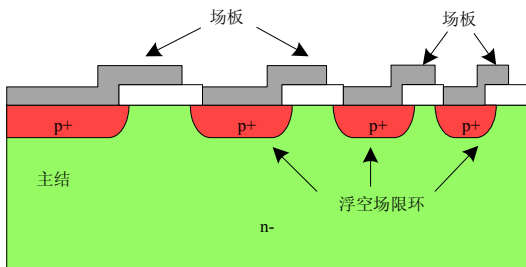


图 18 场限环与场板结合技术的结构示意图

Fig. 18 Structure of field limiting rings combined with field plates

同时,为提高芯片高温性能,采用半绝缘材料,比如掺氧半绝缘多晶硅(semi-insulating polycrystalline silicon, SIPOS)将 p+区和 n+区连接起来,如图 19 所示,从而有效利用半绝缘材料在高温下的微导电性将场限环中聚集的电荷释放出来,避免场板末端出现局部击穿,以提高芯片的高温耐压性能^[49]。并且,SIPOS 层还可以有效阻挡离子对器件的污染,提高器件的可靠性^[50]。

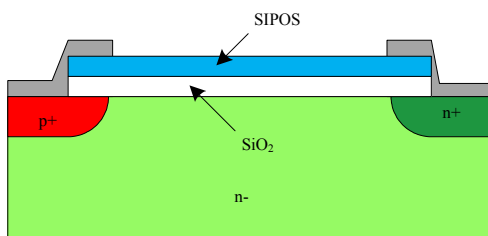


图 19 含 SIPOS 层的终端结构示意图

Fig. 19 Structure of edge termination with SIPOS

为提高电动汽车 IGBT 芯片面积利用率及降低成本,终端结构还可借鉴超级结^[51]或沟槽栅终端结构^[52-53],英飞凌公司已在其 CoolMOS 芯片中应用沟槽栅终端技术,通过横向和纵向相结合的方式分散电场,减小终端结构面积。

3 车规级芯片智能集成技术

智能集成技术的首要目的是要保证 IGBT 芯片在恶劣工况下仍能安全可靠运行,例如通过实时监控 IGBT 芯片结温和瞬态电流调整控制策略,在 IGBT 模块内部设置无损缓冲回路吸收芯片关断时产生的电压尖峰;同时,为提升电动汽车的功率密度,还可以在芯片内部集成部分驱动功能以减小驱动电路体积。

3.1 温度/电流传感器集成技术

对于温度检测,IGBT 模块内集成负温度系数热敏电阻(negative temperature coefficient, NTC)较为常见,但是由于 NTC 与芯片有一定距离,造成结温测量速度慢,精度低,所以并不适用于电动汽车应用工况。因此,芯片上直接集成温度传感器逐渐引起了人们的重视。如图 20 所示,三菱公司通过在 IGBT 芯片上集成基于多个多晶硅二极管并联的结构,利用二极管正向导通压降 V_f 与结温的近线性关系来监控芯片结温,并应用于车规级 J 系列 T-PM IGBT 模块^[54]。集成温度传感器更高的测量精度也有助于芯片通流设计裕量和模块散热器体积减小,提高电动汽车牵引逆变器的功率密度。

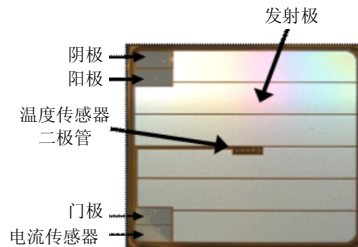


图 20 集成温度和电流传感器的 IGBT 芯片示意图

Fig. 20 IGBT chip with integrated temperature and current sensor

但是在短路或过压等工况引起 IGBT 芯片结温在短时间内急剧升高时,集成温度传感器不足以立即响应保护,因此 IGBT 芯片还需结合集成电流传感器技术,其通过芯片上分出部分元胞的镜像电流来监控主芯片的电流大小;当发动机系统出现异常状况时,IGBT 模块的控制系统可根据当前的电流与结温水平,判断出相应的故障模式,并调整当前控制策略以保护系统正常运行。截至目前,国际知名厂商如英飞凌、三菱和富士等都已经将温度和电流传感器同时集成于电动汽车 IGBT 芯片上^[54-56]。

3.2 门极驱动电阻集成技术

传统 IGBT 模块的驱动电路通常需要分别设置开通和关断时的门极驱动电阻,造成 IGBT 模块的驱动电路体积较大;且驱动电路不可避免地在栅极

回路引入杂散电感，降低 IGBT 芯片的开关速度。

针对上述问题，英飞凌公司提出将门极驱动电阻集成在 IGBT 芯片内部^[57]，如图 21 所示。在沟槽栅门极金属电极的下方添加了 p 区和 n 区掺杂区，当 IGBT 芯片开通时，驱动电流主要通过门极金属电极和正偏的 pn 结流入多晶硅电极中；当 IGBT 芯片关断时，由于 pn 结反偏，驱动电流仅通过门极金属电极与多晶硅电极接触的部分流出。因此，通过门极开通和关断电流流经路径的不同实现 IGBT 芯片开关过程门极驱动电阻的差异化。并且，通过调整 p, n 区的掺杂浓度可以改变驱动电阻的大小。除了上述集成方式外，还可以通过调整 p 区和 n 区的位置或在门极金属电极与多晶硅电极直接接触的部分添加低掺杂 n 区实现 IGBT 芯片门极驱动电阻值的调整，如图 22 所示。采用集成门极驱动电阻的 IGBT 芯片可避免引入外部驱动电路带来的杂散电感，同时减小了驱动电路体积，可以有效提高电动汽车 IGBT 功率模块的功率密度。

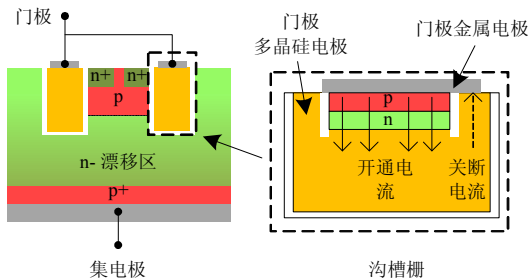
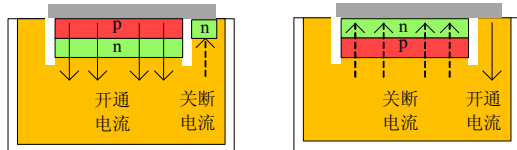


图 21 IGBT 芯片集成门极电阻结构示意图

Fig. 21 Structure of IGBT chip with integrated gate resistor



(a) 在关断电流路径上添加n区 (b) 调换p, n掺杂区位置

图 22 集成门极电阻阻值调整方案

Fig. 22 Methods for adjusting integrated gate resistance

3.3 缓冲电路集成技术

为抑制 IGBT 关断电压过冲/振荡，德国 Fraunhofer IISB 研究所 Matlok 提出了在功率模块内部集成 RC 芯片^[58-59]的方案。传统功率模块外部连接母线和内部回路的杂散电感会造成 IGBT 芯片关断时电压过冲和振荡，而目前的解决方法存在诸多弊端，例如提高驱动电阻、降低开关速度会导致开关损耗增大。如图 23 所示，RC 芯片则可直接焊接于功率模块内部靠近器件的位置，实现器件开关过程与外部杂感的解耦，大幅降低器件关断电压过冲

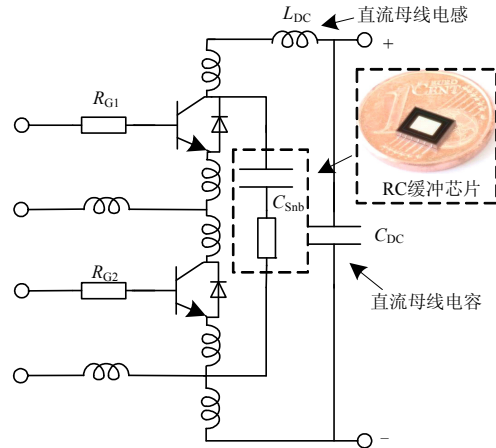


图 23 半桥模块内部集成 RC 缓冲芯片的等效电路图

Fig. 23 Equivalent circuit of integrated Si-RC chip within the half bridge power module

和振荡，保障电动汽车安全可靠地运行。

4 机遇挑战和前景展望

在电动汽车朝着大功率密度、高安全性和低成本的方向前进时，功率器件的电流密度、功率损耗以及可靠性起着关键性作用。元胞、体结构优化和智能集成技术是实现上述目标的根本途径。然而，实现电动汽车 IGBT 芯片优化技术大规模应用和新的突破，还需要开展大量工作，目前面临的挑战有以下几个方面：

1) 沟槽栅精细化的进一步研究。目前，英飞凌公司 EDT2 的台面宽度最小，约为 600nm，但仍远大于理论极限水平 20~40nm^[20]。改进沟槽制造工艺，例如深亚微米级的曝光技术、化学机械抛光、快速热退火处理等，进一步减小槽间台面宽度始终是提升芯片电流密度的关键。

2) IGBT 芯片高压/高温优化技术的研究。电动汽车动力电池电压等级在主流 400V 的基础上呈现上升趋势，目前已有保时捷、雪佛兰、菲斯克等多个汽车厂家都已在开发采用 800V 动力电池的电动汽车，其中保时捷 Taycan 已经进入市场^[60-61]；动力电池电压等级升高对电动汽车 IGBT 芯片的耐压能力提出了更高的要求。提高 IGBT 芯片工作结温是提高功率密度，确保电动汽车逆变器可靠运行的关键。一方面，通过改进缓冲层掺杂方式，来减小高温漏电流；另一方面，需要解决电压回跳问题以推动 RC-IGBT 芯片在电动汽车领域的广泛使用。

3) 多种优化技术组合的探索。IGBT 芯片特性之间相互影响，例如电流密度、开关损耗和短路耐量间存在着复杂的制约关系，仅使用单一技术对 IGBT 芯片性能进行改进会带来新的问题^[62]。沟槽

精细化、超级结、逆导技术、薄片工艺和终端结构技术的结合为电动汽车 IGBT 芯片实现多种特性的折衷提供了更多的可能。

4) 多功能集成技术的研究。进一步提高电动汽车 IGBT 模块的功率密度, 集成化 IGBT 芯片技术是重要手段。通过在芯片上集成部分智能驱动功能, 实现运行异常时的自我纠正, 电动汽车运行可靠性提高的方案有待进一步探索。

5 结论

经过数十年的发展, 硅基 IGBT 芯片元胞和体结构优化技术的不断成熟, 使其已经具有更高的电流密度、可靠性和价格优势^[63]以及更低的功耗。在电动汽车应用领域, IGBT 芯片性能优化的思路基本为: 在沟槽精细化的基础上, 采用薄片工艺并优化背面缓冲层设计, 再结合优良的终端结构提高芯片耐压等级; 还可将 IGBT 芯片和反并联二极管整合于一体, 形成 RC-IGBT 结构, 进一步提升芯片电流密度; 同时, 芯片上集成温度/电流传感器, 门极驱动电阻以及 RC 芯片, 有利于提高芯片长期运行的可靠性。当前, 部分半导体厂商已经将上述优化方式集成, 并在电动汽车 IGBT 芯片上得以实现。

本文分析并探讨了未来电动汽车 IGBT 芯片性能优化的方向, 整理归纳实现芯片电流密度提升、损耗降低的优化方法; 总结了目前常用的提高芯片工作结温和耐压能力的技术; 论述了现有的芯片集成温度/电流传感器和缓冲电路的技术。最后, 指出电动汽车 IGBT 芯片面临的问题, 并展望其发展趋势。希望本文的工作能够为我国电动汽车 IGBT 芯片的设计和优化方向提供参考。

参考文献

- [1] 安锋, 康利平, 秦兰芝, 等. 中国传统燃油汽车退出时间表研究[J]. 国际石油经济, 2019, 27(5): 1-8.
An Feng, Kang Liping, Qin Lanzhi, et al. Study on the phasing-out timetable of China's traditional ICE-vehicles [J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(5): 1-8(in Chinese).
- [2] 闫建涛. 多国将传统燃油车禁售提上日程 能源替代竞争压力冲击石油行业[J]. 国际石油经济, 2018, 26(1): 16-17.
Yan Jiantao. Many countries put the ban on the sale of traditional fuel vehicles on the agenda Energy substitution competition pressure hits oil industry[J]. International Petroleum Economics, 2018, 26(1): 16-17(in Chinese).
- [3] 刘卓然, 陈健, 林凯, 等. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 25-32.
Liu Zhuoran, Chen Jian, Lin Kai, et al. Domestic and foreign present situation and the tendency of electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 25-32(in Chinese).
- [4] 蒋菱枫. 2018 年全国小汽车保有量首次突破 2 亿辆 [EB/OL]. (2019-01-12) [2020-05-31]. <https://www.mps.gov.cn/n2254098/n4904352/c6354939/content.html>.
- [5] 蒋菱枫. 全国私家车保有量首次突破 2 亿辆 66 个城市汽车保有量超过百万辆 [EB/OL]. (2020-01-08) [2020-05-31]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c6852472/content.html>.
- [6] 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.
Qian Zhaoming, Zhang Junming, Sheng Kuang. Status and development of power semiconductor devices and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149-5161(in Chinese).
- [7] 张朋, 韩荣刚, 金锐, 等. 电动汽车用大功率 IGBT 模块封装技术[J]. 智能电网, 2014, 2(1): 48-51.
Zhang Peng, Han Ronggang, Jin Rui, et al. Package design of high power IGBT module for electric vehicle [J]. Smart Grid, 2014, 2(1): 48-51(in Chinese).
- [8] 郭彦杰, 王丽芳, 廖承林. 电动汽车用 IGBT 及逆变器的电磁兼容性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1732-1737.
Guo Yanjie, Wang Lifang, Liao Chenglin. Analysis of EMC characteristics on IGBT and inverter in electric vehicles[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1732-1737(in Chinese).
- [9] 郭淑英, 王征宇, 罗海辉, 等. 电动汽车 IGBT 的研究与应用[J]. 大功率变流技术, 2017(5): 29-35.
Guo Shuying, Wang Zhengyu, Luo Haihui, et al. Research and application of IGBT in electric vehicle[J]. High Power Converter Technology, 2017(5): 29-35(in Chinese).
- [10] Schulze H, Voss S, Huesken H, et al. Reduction of the temperature dependence of leakage current of IGBTs by field-stop design[C]//Proceedings of the 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, San Diego, USA, 2011.
- [11] Mustain H A, Lostetter A B, Brown W D. Evaluation of gold and aluminum wire bond performance for high temperature (500°C) silicon carbide (SiC) power modules [C]//Proceedings Electronic Components and Technology, Lake Buena Vista, USA, 2005.
- [12] Chinthavali M, Tolbert L M, Zhang H, et al. High power SiC modules for HEVs and PHEVs[C]//The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA, Sapporo, Japan, 2010.

- [13] 王学梅. 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 371-379.
Wang Xuemei. Researches and applications of wide bandgap SiC power devices in electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 371-379(in Chinese).
- [14] 盛况, 郭清, 张军明, 等. 碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 1-7.
Sheng Kuang, Guo Qing, Zhang Junming, et al. Development and prospect of SiC power devices in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 1-7(in Chinese).
- [15] 盛况, 董泽政, 吴新科. 碳化硅功率器件封装关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5576-5584.
Sheng Kuang, Dong Zezheng, Wu Xinke. Review and prospect of key packaging technologies for silicon carbide power devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5576-5584(in Chinese).
- [16] 钱照明, 盛况. 大功率半导体器件的发展与展望[J]. 大功率变流技术, 2010(1): 1-9.
Qian Zhaoming, Sheng Kuang. Development and perspective of high power semiconductor device[J]. High Power Converter Technology, 2010(1): 1-9(in Chinese).
- [17] 盛况, 任娜, 徐弘毅. 碳化硅功率器件技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1741-1753.
Sheng Kuang, Ren Na, Xu Hongyi. A recent review on silicon carbide power devices technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1741-1753(in Chinese).
- [18] 张栋, 范涛, 温旭辉, 等. 电动汽车用高功率密度碳化硅电机控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5624-5634.
Zhang Dong, Fan Tao, Wen Xuhui, et al. Research on high power density SiC motor drive controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5624-5634(in Chinese).
- [19] Zhu C, Deviny I, Dai X, et al. A floating dummy trench gate IGBT (FDT-IGBT) for hybrid and electric vehicle (HEV/EV) applications[C]//19th European Conference on Power Electronics and Applications, Warsaw, Poland, 2017.
- [20] Nakagawa A. Theoretical investigation of silicon limit characteristics of IGBT[C]//Proceedings of the 18th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Naples, Italy, 2006.
- [21] Wolter F, Roesner W, Cotorogea M, et al. Multi-dimensional trade-off considerations of the 750V micro pattern trench IGBT for electric drive train applications[C]//Proceedings of the 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Kowloon Shangri-La, Hong Kong, 2015.
- [22] Geinzer T, Boeving H, Reiter T, et al. Value creation developing efficient 750V IGBT and emitter controlled diode for automotive applications[C]//Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2015.
- [23] Yao Y, Luo H, Xiao Q, et al. Low Loss 820A/750V S3+ IGBT Module with New IGBT and Diode technology for EV/HEV Application[C]//Proceedings of PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2019.
- [24] Deviny I, Luo H, Xiao Q, et al. A novel 1700V RET-IGBT (recessed emitter trench IGBT) shows record low VCE(ON), enhanced current handling capability and short circuit robustness[C]//Proceedings of the 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Sapporo, Japan, 2017.
- [25] Jaeger C, Philippou A, Vellei A, et al. A new sub-micron trench cell concept in ultrathin wafer technology for next generation 1200 V IGBTs[C]//Proceedings of the 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Sapporo, Japan, 2017.
- [26] Yao Y, Luo H, Xiao Q, et al. A 750V recessed-emitter-trench IGBT with recessed-dummy-trench structure featuring low switching losses[C]//Proceedings of the 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Chicago, USA, 2018.
- [27] Eikyu K, Sakai A, Matsuura H, et al. On the scaling limit of the Si-IGBTs with very narrow mesa structure[C]//Proceedings of the 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Prague, Czech Republic, 2016.
- [28] Eikyu K, Sakai A, Matsuura H, et al. Study on the improved short-circuit behavior of narrow mesa Si-IGBTs with emitter connected trenches[C]//Proceedings of the 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Chicago, USA, 2018.
- [29] Ohi K, Ikura Y, Yoshimoto A, et al. Ultra low miller capacitance trench-gate IGBT with the split gate structure [C]//Proceedings of the 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Kowloon Shangri-La, Hong Kong, 2015.
- [30] Sawada M, Ohi K, Ikura Y, et al. Trench shielded gate concept for improved switching performance with the low miller capacitance[C]//Proceedings of the 28th International Symposium on Power Semiconductor

- Devices and IC's, Prague, Czech Republic, 2016.
- [31] Feng H, Yang W, Onozawa Y, et al. A New Fin p-Body Insulated Gate Bipolar Transistor With Low Miller Capacitance[J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36(6): 591-593.
- [32] Shiraishi M, Furukawa T, Watanabe S, et al. Side Gate HiGT with low dv/dt noise and low loss[C]// Proceedings of the 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Prague, Czech Republic, 2016.
- [33] Onozawa Y, Nakano H, Otsuki M, et al. Development of the next generation 1200V trench-gate FS-IGBT featuring lower EMI noise and lower switching loss[C]// Proceedings of the 19th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Jeju, Korea, 2007.
- [34] T. Takeda, M. Kuwahara, S. Kamata, et al. 1200 V trench gate NPT-IGBT (IEGT) with excellent low on-state voltage[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Kyoto, Japan, 1998.
- [35] Eckel H, Fleisch K. Turn-off behaviour of high voltage NPT and FS-IGBT[C]//Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, Poland, 2008.
- [36] Honda S, Haraguchi Y, Narazaki A, et al. Next generation 600V CSTBT™ with an advanced fine pattern and a thin wafer process technologies[C]//Proceedings of the 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Bruges, Belgium, 2012.
- [37] Takahashi T, Yoshiura Y. The 6th generation IGBT & thin wafer diode for new power modules[J]. Mitsubishi Denki Giho, 2011(84): 224-227.
- [38] Fukada Y, Suzuki K, Takahashi T, et al. CSTBT™(III) having wide SOA under high temperature condition[C]// Proceedings of the 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, San Diego, USA, 2011.
- [39] Takahashi H, Tomomatsu Y. Next-Generation IGBTs (CSTBTs)[J]. Power Electronics Edition, 2002.
- [40] Hsieh A P, Camuso G, Udrea F, et al. Superjunction IGBT vs. FS IGBT for 200°C operation[C]//Proceedings of the 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Kowloon Shangri-La, Hong Kong, China, 2015.
- [41] Chow T P, Baliga B J, Chang H R, et al. P-channel, vertical insulated gate bipolar transistors with collector short[C]//International Electron Devices Meeting, Washington, USA, 1987.
- [42] 黄先进, 凌超, 孙湖, 等. 应用于车载变流器的 RC-IGBT 工作特性[J]. 半导体技术, 2017, 42(5): 363-370.
- Huang Xianjin, Ling Chao, Sun Hu, et al. Working characteristics of reverse-conducting IGBT applied in vehicle converters[J]. Semiconductor Devices, 2017, 42(5): 363-370(in Chinese).
- [43] Osawa A, Higuchi K, Kitamura A, et al. 700 kVA/L power density IGBT module for xEV power train[C]//PCIM Asia 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2017.
- [44] 谢加强. RC-IGBT 和续流二极管新结构及特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Xie Jiaqiang. Characteristic research of new structural RC-IGBT and freewheeling diode[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [45] 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]//Proceedings of the 12th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Toulouse, France, 2000.
- [46] Iwamuro N, Laska T. IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects[J]. IEEE Transactions On Electron Devices, 2017, 64(3): 741-752.
- [47] Buitrago E, Mesemanolis A, Andenna M, et al. A Critical View of IGBT Buffer Designs for 200 °C Operation[C]// Proceedings of the 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Shanghai, China, 2019.
- [48] Vobecky J, Rahimo M, Kopta A, et al. Exploring the Silicon Design Limits of Thin Wafer IGBT Technology: The Controlled Punch Through (CPT) IGBT[C]// Proceedings of the 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Orlando, USA, 2008.
- [49] 孔晓李. 高压功率器件结终端技术分析与新结构研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- Kong Xiaoli. Research on the technology and new structure of terminal in the high voltage power devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016(in Chinese).
- [50] Matsushita T, Aoki T, Ohtsu T, et al. Highly reliable high-voltage transistors by use of the SIPOS process[J]. IEEE Transactions On Electron Devices, 1976, 23(8): 826-830.
- [51] Udrea F, Trajkovic T, Thomson J, et al. Ultra-high voltage device termination using the 3D RESURF (super-junction) concept - experimental demonstration at 6.5kV[C]// Proceedings of the 13th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Osaka, Japan, 2001.

- [52] Siemieniec R, Hirler F, Geissler C. Space-saving edge-termination structures for vertical charge compensation devices[C]//Proceedings of the 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, 2009.
- [53] Seto K, Kamibaba R, Tsukuda M, et al. Universal Trench Edge Termination Design[C]//Proceedings of the 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, Bruges, Belgium, 2012.
- [54] Wang K, Liao Y, Song G, et al. Over-Temperature protection for IGBT modules[C]//PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2014.
- [55] Karim R. On-Chip Current Sense: A New Approach for Over Current and Short Circuit Detection for Automotive Main Inverter[C]//PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2018.
- [56] Nakayama T, Nakano H, Yoshida S. On-Chip Sensor Built-In IGBT Modules for Driving xEV Motors[J]. Power Semiconductors Contributing in Energy Management, 2018, 64(4): 186.
- [57] Voss S, Tuerkes P, Huesken H. Power MOS transistor with integrated gate-resistor: USA, 9041120 [P]. 2015-05-26.
- [58] Matlok S, Boettcher N, Jahn M, et al. Retrofitting Wide Band Gap Devices to Classic Power Modules using Silicon RC Snubbers[C]//PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2019.
- [59] Matlok S, Erlbacher T, Krach F, et al. Switching SiC devices faster and more efficient using a DBC mounted terminal decoupling Si-RC element[C]//European Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Halkidiki, Greece, 2016.
- [60] IDTechEx. Electric vehicles go high voltage[EB/OL]. (2019-05-31) [2020-05-31]. <https://www.Idtechex.com/en/research-article/electric-vehicles-go-high-voltage/17347>.
- [61] Wikipedia. Porsche Taycan[EB/OL]. [2020-05-31]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Porsche_Taycan&oldid=950544301.
- [62] 陈玉香. 大容量沟槽栅-场截止型 IGBT 本征关断特性和短路强健性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. Chen Yuxiang. Turn-off behavior and short-circuit ruggedness of high-power trench gate/field-stop IGBTs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [63] Liu G, Li K, Wang Y, et al. Recent advances and trend of HEV/EV-oriented power semiconductors—an overview [J]. IET Power Electronics, 2020, 13(3): 394-404.



罗皓泽

收稿日期: 2020-06-03。

作者简介:

罗皓泽(1986), 男, 特聘研究员, 研究方向为功率器件可靠性技术, haozeluo@zju.edu.cn;

高洪艺(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为功率器件应用技术, hongyi.gao@zju.edu.cn;

朱春林(1976), 男, 工程师, 研究方向为 IGBT 器件芯片技术, Chunlin_zhu@dynexsemi.com。

(责任编辑 李婧妍)

Review and Prospect of IGBT Chip Technologies for Electric Vehicles

LUO Haoze¹, GAO Hongyi¹, ZHU Chunlin², LI Wuhua¹, HE Xiangning¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University; 2. Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Company Limited)

KEY WORDS: micro pattern trench gate technology; dummy trench; high temperature technology; intelligent integration

Complex operating conditions and the consumption characteristic require electric vehicles to have properties such as large power output capability, high efficiency, safety and reliability. In view of the demand analysis of electric vehicles, silicon-based IGBT chips are the mainstream power devices used in electric vehicle inverters. The development process is shown in Fig. 1. This article focuses on three key optimization interests of electric vehicle IGBT chip: high current density and low loss optimization technology, high voltage/temperature technology, and intelligent integration technology. Besides, the article prospects the electric vehicle IGBT chip technology.

Trench gate technology is a main way to improve the current density of IGBT chip of electric vehicles and reduce the power loss, as Fig. 2 shows. Besides, reducing the mesa width is the main optimization method. The current IGBT chip mesa width is much larger than the theoretical limit of silicon IGBT (20-40 nm), so the optimization trend of reducing the mesa width will not change at present. On this basis, combining with the dummy gate structure, the shield gate structure and carrier stored layer design can reduce the on-state voltage drop and miller capacitance for power loss reduction. With further improvement of electric vehicles' requirements for IGBT chip power density, cost and junction temperature, as well as manufacturing process, super junction IGBTs and reverse conducting IGBTs will be applied in electric vehicles.

The overload operation of the electric vehicle traction inverter will cause the IGBT chip to withstand overvoltage and high temperature, so optimizing buffer layer and edge termination structure is needed. What's more, intelligent integration technology, such as integrated temperature/current sensor and driver/buffer circuit, is to ensure that the IGBT chip can still operate safely and reliably under harsh working conditions.

However, there are still some challenges for electric vehicle IGBT: 1) The mesa width should be reduced further to increase current density. 2) The increased electric vehicle battery voltage level puts higher

requirements on the IGBT breakdown voltage. 3) The combination of multiple optimization technologies provides more possibilities for the compromise of various characteristics. 4) The realization of self-correction for improving the operation reliability needs to be further explored.

After decades of development, the continuous maturity of the cell and body structure optimization technology of silicon-based IGBT chip has enabled it to have higher current density, reliability and price advantages and lower power losses. In the application field of electric vehicles, the methods of optimizing the performance of IGBT chip are: 1) refinement of the trench; 2) thin chip technology and the optimization of the back buffer layer design; 3) optimized terminal structure to improve the chip voltage level; 4) integrating the IGBT and the anti-parallel diode to form RC-IGBT structure; 5) the integrated temperature/current sensor, gate drive resistor and RC chip on the chip for improving the reliability of the chip's long-term operation. At present, some semiconductor manufacturers have integrated the above optimization methods and implemented them on the IGBT chip of electric vehicles.

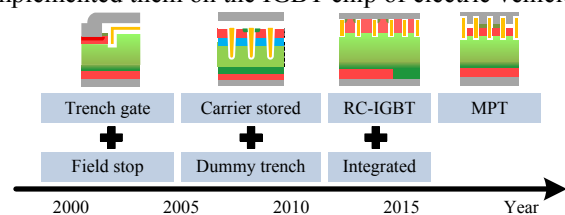


Fig. 1 Development of IGBT chip technology for electric vehicles

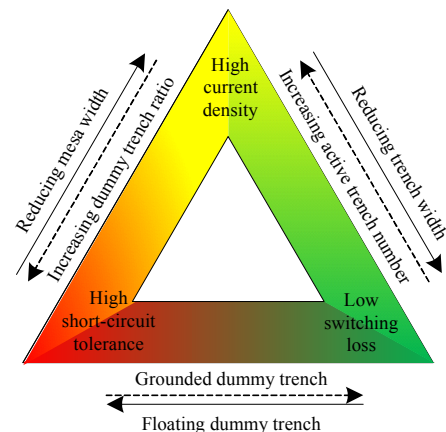


Fig. 2 Design trade-off of trench gate technology