

高关断能力压接型 IGBT 器件研制

冷国庆, 赵 弢, 金 锐, 高明超, 温家良, 潘 艳

(全球能源互联网研究院 功率半导体研究所, 北京 102209)

摘 要: 直流断路器是高压直流输电系统换流站的主要电气设备之一。作为直流断路器中关键部件, 压接型 IGBT (insulated gate bipolar transistor) 的电学性能及可靠性尤为重要。基于直流断路器的特性需求, 开发出一款具有高关断能力的 3 300 V 压接式 IGBT 芯片。该芯片具有良好的开关特性、短路特性及坚固性, 可通过 8 倍额定电流关断测试, 且与自主研制的 FRD 芯片有良好的匹配性; 基于此芯片研制的高关断压接型 IGBT 模块已通过仿工况关断能力测试。

关键词: 绝缘栅双极晶体管; 压接型 IGBT 器件; 短路安全工作区; 结构设计

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)05-0070-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.05.012

Research on the Press-pack IGBT with High SCSOA

LENG Guoqing, ZHAO Ge, JIN Rui, GAO Mingchao, WEN Jialiang, PAN Yan

(Department of Power-semiconductor, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: DC breaker is one of the main equipment of HVDC system converter station. As an essential component of DC breaker, the electrical performance and reliability of the press-pack IGBT (insulated gate bipolar transistor) are particularly important. Based on the demand characteristics of DC breakers, a 3 300 V IGBT chip with high turn-off capability was developed. The chip has excellent switching characteristics, short circuit characteristics and good ruggedness, and can pass shut-off $8X I_c$. It has a good compatibility with independently developed FRD chip. The IGBT module of high turn-off capability which was developed based on this chip, passed the turn-off capability test under simulated working conditions.

Keywords: IGBT; press-pack IGBTs; SCSOA; structure design

0 引言

随着直流电网的发展, 针对高压直流断路器的研究越发受到关注。高压直流断路器是多端直流输配电系统和直流电网的主要电气设备之一, 是保证未来智能电网安全可靠运行的重要环节。它既能在正常运行工况下接通、承载和分断直流负荷电流, 又可以在系统故障情况下快速、可靠地分断各种故障电流, 切除故障线路^[1]。直流断路器中的压接式 IGBT 器件作为新一代高压大功率可关断电力电子器件, 由于其优越的门极控制功能和较低的通态损耗, 已成为大功率电力电子产品中的首选器件^[2]。

压接式 IGBT 相比传统模块式 IGBT 的优势在于其取消了绝大部分的焊接点, 内部引线采用压接方式接触, 有效降低了因功率循环和热循环而造成的焊点开裂的故障率。另外, 压接式封装的失效形式为短路形式, 在承受过电压而击穿的过程中, 引线与硅芯片形成共融导电合金, 在集电极和发射极之间形成短路。这种失效机制的好处是, 在应用于直流输电工程中, 即使串联的 IGBT 中有一个失效, 依靠冗余的器件仍可以正常工作。此外, 压接式 IGBT 功率端子是专为连接叠片式低电感集流铜排而设计的, 在模块的内部芯片上层采用金属层结构覆盖, 作为压力元件支持模块在失效情况下继续工作, 不影响系统的正常运行, 同时可起到热屏蔽和电磁屏蔽的作用, 这些独特的设计使得压接式 IGBT 在电力系统应用领域具有独特的优势^[3]。

收稿日期: 2017-08-17

作者简介: 冷国庆 (1981-), 男, 工程师, 主要从事 IGBT 芯片研发工作。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0901802); 北京市优秀人才培养资助基金 (2015000102592G284)

本文根据直流断路器所用压接型 IGBT 器件的特性需求，通过芯片结构设计、性能仿真、定制化工艺等，成功开发出了一款具有高关断能力的 3 300 V 压接式 IGBT 芯片。该芯片采用了适合压接形式的结构设计，且具有良好的开关特性、短路特性及宽泛的安全运行边界，基于此芯片研制的高关断压接型 IGBT 器件已通过仿工况关断能力测试。

1 压接式 IGBT 器件设计

1.1 元胞栅极结构设计

设计高压 IGBT 器件元胞结构时，需要折中考虑器件的各项参数性能及在压力条件下的参数变化。图 1 示出所设计的高关断能力 IGBT 器件平面栅元胞结构，元胞的栅极位于半导体的上表面，栅极边缘与重掺杂的 N⁺ 发射区交叠，避免了电场集中现象；相邻的 P 型基区之间形成 JFET 区，当器件导通时，电子从发射区通过沟道进入器件上表面的 N⁻ 漂移区，然后穿过 JFET 区流向集电区。由于 JFET 区的存在，增大了器件的导通压降。这种栅极结构工艺相对简单，即使在承受压力的条件下器件也具有良好的坚固性。另外，N⁺ 区掺杂形貌采用多次注入单次推结形成，这一设计较常规设计可提高 IGBT 的抗门锁电流，提升了器件的过流关断能力。

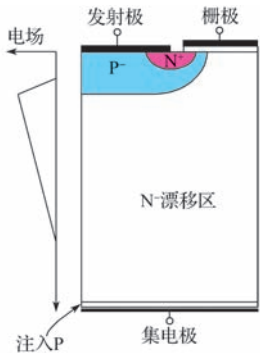


图 1 高关断能力 IGBT 平面栅元胞结构

Fig. 1 Cell structure of the high turn-off capability planar gate IGBT

1.2 终端结构设计

IGBT 器件在截止态时，元胞区的耗尽层在元胞区域内扩展。由于芯片面积有限，在器件元胞结构边缘处必须采用特殊的结构设计以保证器件的耗尽层平滑地向外扩展，这种技术称为结终端技术，这种结构称为终端结构^[4]。图 2 示出高短路关断能力压接型 IGBT 器件芯片的场板结终端结构及其特性曲线。可以看出，在 P⁺N 结加一反向偏置电压时，场板上的感生负电荷会与 N 区耗尽层内正性电荷相互作用，扩展半导体表面处耗尽区宽度，从而起到降低边缘电场的作用。

在场板结终端结构中，P⁺N 结在半导体表面处的展

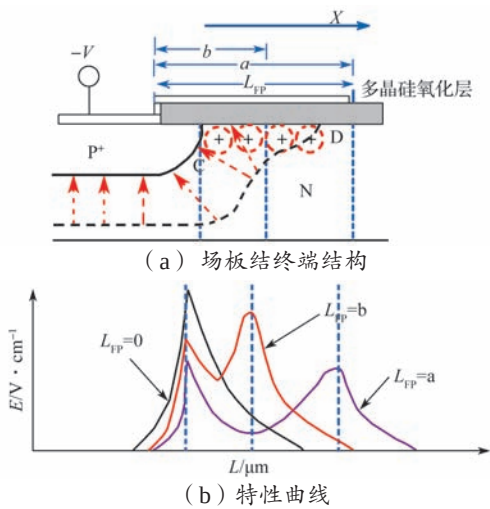


图 2 场板结终端结构及特性

Fig. 2 Field plate junction termination structure and its characteristics 开宽度对器件最终耐压程度有较大影响，影响这一结果的主要因素为介质层（SiO₂）的厚度和场板 L_{FP} 的长度。L.E.Clark 等^[5]在实验中得出：当场板覆盖较小时，击穿电压随场板长度的增加而增加，但是当增加到一定倍数时不再明显增加。式（1）为终端击穿电压表达式，其中 ϵ_{si} 和 ϵ_{ox} 分别是硅和氧化层的介电常数， $E_{C, PP}$ 是硅的临界击穿场强， t_{ox} 是氧化层厚度， N_B 表示掺杂浓度。因此，在设计过程中对场板长度、介质层厚度、半导体表面区域的掺杂方式及浓度需要优化处理。

$$V_{(BR)FP} = 5.34 \times 10^{13} N_B^{-0.75} + \frac{\epsilon_{si}}{\epsilon_{ox}} \times E_{C, PP} \times t_{ox} \quad (1)$$

在保证整个终端结构耐压的同时，这种终端结构还不容易受机械应力的影响，即在压接模块工艺过程中能够保持良好的坚固性。

1.3 工艺设计

高短路关断压接型 IGBT 器件芯片工艺过程主要分为以下 4 个方面：衬底材料准备、正面结构制作（包括终端区、栅极结构、P 型基区、N⁺ 发射区、钝化结构的制作及正面金属系统的形成）、背面减薄、背面 P⁺ 集电区及背面的金属化。压接型 IGBT 器件芯片整套工艺流程开发有别于传统的中低压 IGBT 流程，不同的工艺对器件特性参数会有较大的影响，图 3 示出工艺条件对饱和压降影响的仿真。压接型 IGBT 器件涉及一些特殊的关键工艺，尤其是终端结构与有源区交界处，需采用适当的钝化结构及金属材料以抑制相应产生的薄弱点，使制成的芯片在适于压接的同时具有较宽的安全工作区。

该 IGBT 器件采用多芯片压接后并联方式，内部单元采用一种新型的圆周凸台布局（图 4），其在不改变金属电极底部半径前提下同时保证凸台之间的最小距离为 6 mm^[6]。这种设计使器件具有较好的均流特性，从而优化了器件的关断能力。

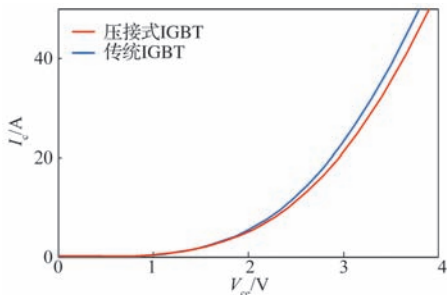


图3 传统IGBT及压接式IGBT饱和压降仿真
Fig. 3 Simulated saturation voltages of traditional IGBT and press-pack IGBT

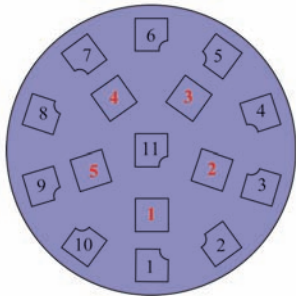


图4 新型圆周凸台布局
Fig. 4 New circular layout of copper emitter pillars

1.4 高关断能力 IGBT 与 FRD 的匹配设计

IGBT 与 FRD 的匹配设计主要是针对器件的实际应用，在特定的 IGBT 芯片技术条件下，合理设计 FRD 的结构参数、封装参数及电路参数。这种匹配设计将为 IGBT 模块的研发提供一定的理论基础和实验依据。图 5 为进行高关断能力 IGBT 与 FRD 匹配设计的仿真电路图，根据仿真可判定 IGBT 与 FRD 在匹配时的动态特性及浪涌特性，利于对 FRD 选型判断^[7]。

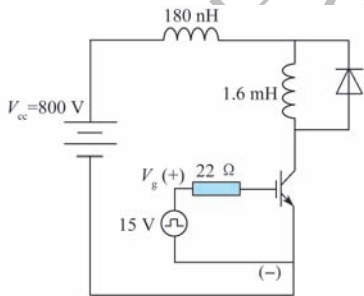


图5 IGBT 与 FRD 仿真电路图
Fig. 5 Simulation circuit for IGBT and FRD

在器件研制的过程中还需要考虑 FRD 的外特性，包括额定电压、额定电流、额定频率等，在器件参数方面包括结构、寿命控制、阳极发射效率控制等^[8-9]。根据以上考虑，图 6 为针对高关断能力压接型 IGBT 器件研制的一种新型 FRD 结构，其采用高、低浓度相间的 P⁺ 掺杂方式以降低反向峰值电流，提高器件软度因子，该结构 FRD 已通过 14 倍额定电流浪涌测试及相关可靠性实验，且在压接型器件内部与 IGBT 单元具有良好的匹配性。

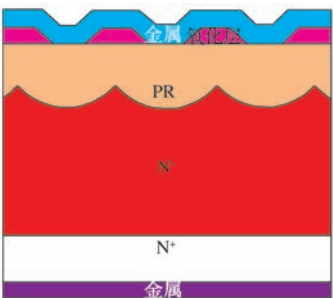


图6 FRD 结构
Fig. 6 Structure of FRD

2 器件参数特性

2.1 单管器件特性

芯片加工制造完成后，在制成高电流等级多芯片并联压接型器件前，将芯片制成单管器件（3 300 V）进行测试评估。图 7 示出单芯片器件开通与关断实际测试波形。

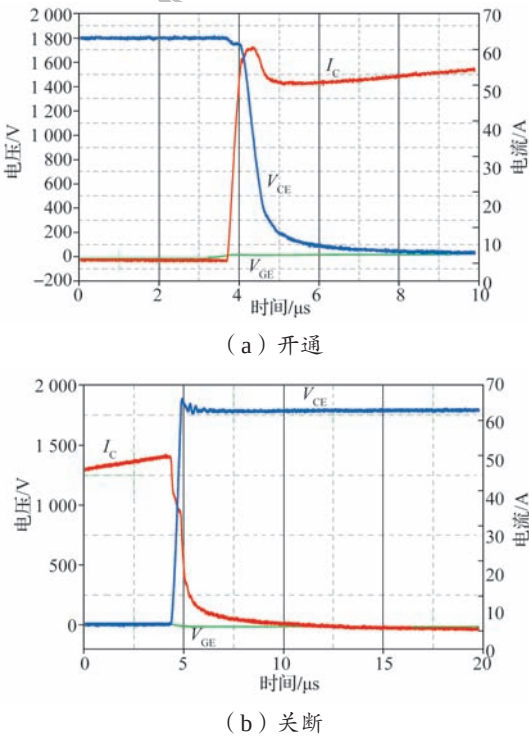


图7 IGBT 开通和关断测试波形
Fig.7 Test waveforms of the IGBT as turning-on and turning-off

根据最终器件技术要求，需要关注 IGBT 关断特性。将 IGBT 关断时的栅极电压置为 0 或负值，在 V_{CE} 电压上升期间，沟道电流减少，同时流经 P 阱的空穴电流等量增加，载流子被空穴电流从 n 基区抽取，在此过程中可能出现闩锁效应。为了避免这一现象的出现，一方面需限制 IGBT 可能关断的最大电流，另外提升器件自身抗闩锁能力同样重要^[10]。图 8 示出 8 倍额定电流关断波形。可以看出，器件被成功关断，关断后拖尾电流较为平滑，无明显振荡现象。

针对 IGBT 器件应用于直流断路器的特殊工况，进行特殊的单芯片器件模拟工况测试（图 9）。测试时，被测

IGBT 器件需要在零电压工况下进行开通。开通瞬间，电流上升至额定工作电流值，之后便以缓慢的变化率上升到至少 5 倍额定电流后关断器件；关断瞬间，器件电流迅速下降，同时被测器件两端电压缓慢上升到额定高压值。该测试主要为考察器件能否适用于直流断路器特殊工况，是否具备承受及可靠关断微秒级浪涌电流的能力。单管器件可成功通过此项测试，实现了 7 倍额定电流关断。

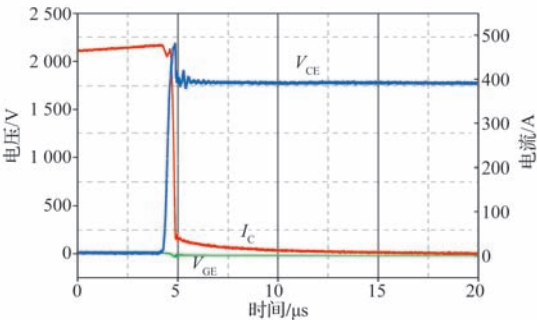


图 8 8 倍额定电流关断曲线
Fig. 8 $8\times I_c$ turning-off curves

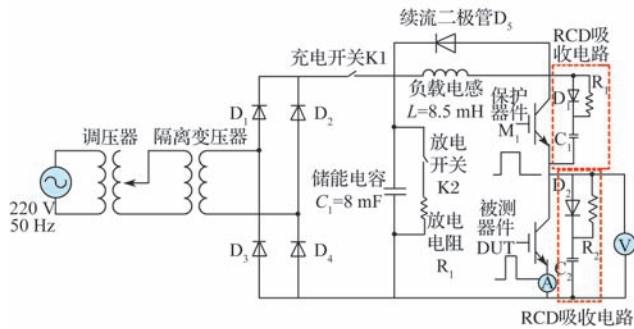


图 9 单芯片器件模拟工况测试电路
Fig. 9 Test circuit of single-chip device under simulated condition

2.2 多芯片并联压接型器件特性

直流断路器是直流配电网安全运行和保护的关键设备，其可以迅速将供电系统的正负极大电流切断，同时还可以灭弧，对防止故障范围扩大有着重要的意义^[1]。根据同行业直流牵引供电系统的短路故障分析处理特点，当离供电所较近位置发生正负短路时，线路电感非常小，发生短路瞬间的电流上升率非常大，毫秒时间内短路电流可以达到数万安培以上；当离供电所较远位置发生正负短路时，线路电感相对较大，发生短路瞬间的电流上升较缓，毫秒时间内短路电流相对较小^[1]。结合直流断路器这一工作特点，基于高关断 3 300 V 压接式 IGBT 芯片研制的 3 300 V/1 500 A 高关断能力压接型 IGBT 器件如图 10 所示。

根据直流断路器的特殊工况，对器件进行基本参数和仿工况关断能力测试。图 11 示出其仿工况关断能力测试结果。结果显示，器件通过了 7 倍额定电流（10.5 kA）关断能力测试，且重复测试多次后，器件仍可正常工作。

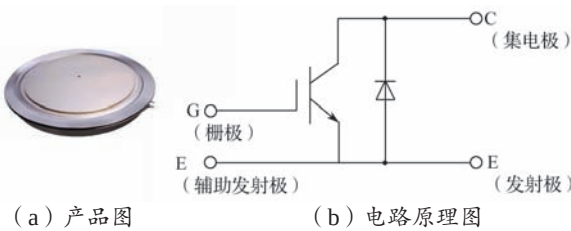


图 10 压接型 IGBT 器件
Fig. 10 The press-pack IGBT

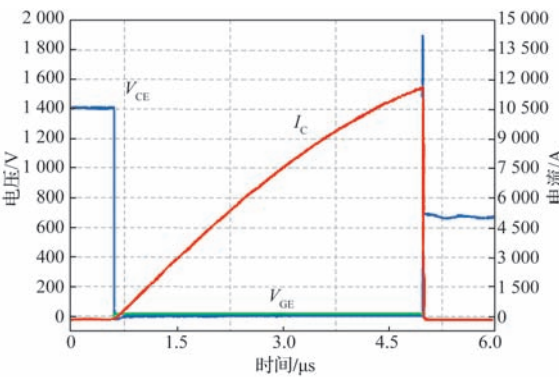


图 11 压接型器件模拟工况测试
Fig. 11 Running conditions simulated test for press-pack IGBT

在测试过程中，为了最大程度发挥器件自身潜能，针对测试装置采用定制化的 IGBT 驱动电路，并通过多次调试使其与器件能更好的匹配。在关断过程中，测试电路采用多级软关断技术，极大程度限制关断电压过冲，且在器件发生退饱和后可主动关断，使其在安全范围内发挥器件的极限性能。

3 结语

根据直流断路器用高短路关断能力压接型 IGBT 器件特性需求，利用现有的工艺平台结合理论研究及仿真设计成功研制了一款高关断能力压接型 IGBT 器件芯片；并在芯片制造过程中，针对压接封装形式进行了定制化工艺开发，目前该芯片已具备量产能力。基于该芯片研制的 3 300 V/1 500 A 高关断能力压接型 IGBT 器件参数满足设计需求且通过了直流断路器仿工况关断能力测试。如何利用新的设计理念和加工技术以及新材料来进一步优化高关断能力压接型 IGBT 器件的参数性能和提高产品优良率有待我们进一步认识和探索。

参考文献：

[1] 药韬, 温家良, 李金元, 等. 基于 IGBT 串联技术的混合式高压直流断路器方案 [J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2484–2489.
YAO T, WEN J L, LI J Y, et al. A Hybrid High Voltage DC Circuit Breaker Design Plan with Series-Connected IGBTs [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2484–2489.
[2] TAKAHASHI Y, KOGA T, KIRIHATA H, et al. 2.5 kV-100 A Flat-Packaged IGBT(Micro-Stack IGBT) [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(12): 2276–2282.

(下转第 88 页)