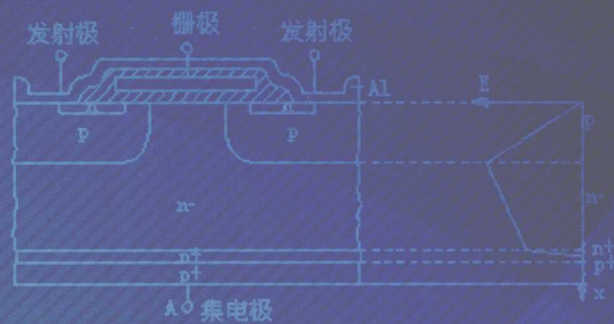
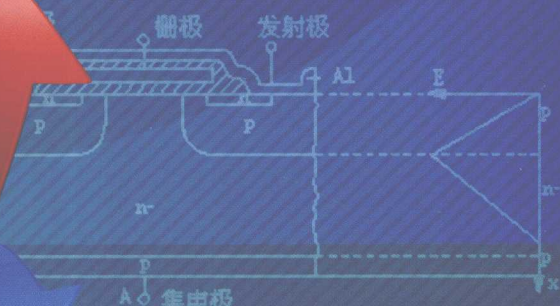




(a) PT型 IGBT



(b) NPT型 IGBT

周志敏 纪爱华 等编著

IGBT驱动与保护电路设计 及应用电路实例

IGBT QUDON



NLU SHEJI

JI YINGYONG

YZL10890101920

DIANLU SHILI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



IGBT 驱动与保护电路设计及 应用电路实例

周志敏 纪爱华 等编著



YZLI0890101920



机械工业出版社

本书结合国内外 IGBT 的发展和最新应用技术,以从事 IGBT 应用电路设计人员为本书的读者对象,系统、全面地讲解了 IGBT 应用电路设计必备的基础知识,并选取和总结了 IGBT 的典型应用电路设计实例,以供从事 IGBT 应用电路设计的工程技术人员在实际设计工作中参考。

全书共分为 6 章,在概述了 IGBT 的发展历程与发展趋势的基础上,讲解了 IGBT 的结构和工作特性、IGBT 模块化技术、IGBT 驱动电路设计、IGBT 保护电路设计、IGBT 应用电路实例等内容。本书题材新颖实用、内容丰富、文字通俗、具有很高的实用价值。

本书可供电信、信息、航天、电力、军事及家电等领域从事 IGBT 应用电路开发、设计、应用的工程技术人员和高等院校及职业技术学院的师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

IGBT 驱动与保护电路设计及应用电路实例/周志敏等编著.

—北京:机械工业出版社,2011.7

ISBN 978-7-111-35276-1

I. ①I… II. ①周… III. ①绝缘栅场效应晶体管—
电路设计 IV. ①TN386.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 131918 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:林春泉

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:路恩中 责任印制:乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17.5 印张·427 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-35276-1

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

20 世纪 80 年代, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管) 器件研发成功, 由于 IGBT 器件为电压驱动型, 所需驱动功率小、开关速度快、饱和压降低以及可耐高电压、大电流等一系列应用上的优点, 并可用 IC (Integrated Circuit, 集成电路) 来实现驱动和控制, 进而发展到把 IGBT 芯片、快速二极管芯片、控制和驱动电路、过电压/过电流/过热/欠电压保护电路、钳位电路以及自诊断电路等封装在同一绝缘外壳内的 IPM (Intelligent Power Module, 智能功率模块)。它为电力电子变换器的高频化、小型化、高可靠性和高性能奠定了器件基础。IGBT 在现代电力电子技术中占据着重要的地位, 它正向高频化、大功率化、智能化和模块化方向发展, 其中, 在模块化应用及研发领域更为广泛和深入。

目前, IGBT 应用技术已经成为应用最广泛和最受关注的技术之一, 随着新型 IGBT 器件开发和应用技术的发展, 它已成为了一个涉及领域十分广泛的学科, 可以说, 凡是涉及电能应用的场合便有其用武之地。时至今日, 它不仅已发展成为高科技的一个分支, 而且还是许多高科技的支撑。

为此, 本书结合国内外 IGBT 的发展及最新应用技术, 在概述 IGBT 发展历程及发展趋势、IGBT 结构与特性的基础上, 重点阐述了 IGBT 的驱动、保护电路的设计及应用电路实例。本书在写作上尽量做到有针对性和实用性, 力求做到通俗易懂和结合实际, 使从事 IGBT 电路开发、设计、应用的工程技术人员从中获益, 读者可以以此为“桥梁”, 系统全面地了解和掌握 IGBT 的应用技术。

参加本书编写工作的还有周纪海、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬、纪和平、纪达奇等人, 本书在资料的收集和技术信息交流等方面得到了国内外的专业学者和半导体功率器件制造商的大力支持, 使本书兼具了技术前沿和实用的特点, 在此表示衷心的感谢。

由于时间短, 水平有限, 书中难免有错误之处, 敬请广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 IGBT 的发展历程与发展趋势 ... 1

- 1.1 IGBT 的发展历程 1
 - 1.1.1 电力电子器件的发展 1
 - 1.1.2 IGBT 的发展 4
- 1.2 IGBT 的发展趋势 9
 - 1.2.1 IGBT 器件的研发 9
 - 1.2.2 IGBT 模块的发展趋势 13

第2章 IGBT 的结构和工作特性 16

- 2.1 IGBT 结构及特性 16
 - 2.1.1 IGBT 的结构与工作原理 16
 - 2.1.2 IGBT 的基本特性 23
 - 2.1.3 带反向阻断型 IGBT 的特性 33
 - 2.1.4 IGBT 的锁定效应和安全工作区 ... 34
- 2.2 IGBT 等效电路模型及主要参数 36
 - 2.2.1 IGBT 等效电路模型 36
 - 2.2.2 IGBT 的主要参数 38

第3章 IGBT 模块化技术 40

- 3.1 功率模块 40
 - 3.1.1 功率模块的构造 40
 - 3.1.2 功率模块的性能 47
 - 3.1.3 IGBT 模块新技术 50
 - 3.1.4 IGBT 模块的最新发展 54
- 3.2 新型 IGBT 模块 56
 - 3.2.1 IR 系列 IGBT 模块 56
 - 3.2.2 高压 IGBT 模块 58
 - 3.2.3 IGBT 变频器模块 61
- 3.3 智能功率模块 (IPM) 65
 - 3.3.1 IPM 的特点与分类 65
 - 3.3.2 IPM 的结构与特性 66
 - 3.3.3 IPM 的保护功能及死区时间 71
 - 3.3.4 富士电机公司的 R 系列 IPM 73

第4章 IGBT 驱动电路设计 83

- 4.1 IGBT 驱动技术 83
 - 4.1.1 IGBT 栅极驱动要求 83
 - 4.1.2 IGBT 的驱动电路 88
- 4.2 M579 系列 IGBT 驱动模块 92

- 4.2.1 M57957L/M57958L 厚膜驱动器
集成电路 92

- 4.2.2 M57962L 厚膜驱动器集成电路 95

- 4.2.3 M57962AL 厚膜驱动器集成电路 ... 97

- 4.3 IR 系列集成驱动模块 99

- 4.3.1 IR2110 集成驱动器 99

- 4.3.2 IR2130 驱动器及其在逆变器中的
应用 105

- 4.3.3 IR 系列高速驱动集成电路 108

- 4.3.4 IR2233 功率集成电路 110

- 4.4 SCALE 集成 IGBT 驱动板 112

- 4.4.1 SCALE 集成电路 112

- 4.4.2 2SD315A 驱动集成电路 116

- 4.5 EXB 系列 IGBT 驱动器 121

- 4.5.1 EXB 系列集成驱动器 121

- 4.5.2 EXB 系列驱动器应用电路 127

- 4.6 IGD/DH/HL/HC 系列 IGBT 驱动
模块 131

- 4.6.1 IGD508EI (EN) /IGD515EI (EN)
驱动模块 131

- 4.6.2 DH57962L 驱动模块 134

- 4.6.3 HL402 驱动模块 137

- 4.6.4 HCPL-316J 驱动模块 140

- 4.7 TX 系列驱动器 143

- 4.7.1 TX-KA 系列 IGBT 驱动器 144

- 4.7.2 TX-KB 系列驱动器 161

- 4.7.3 TX-KC 系列 IGBT 驱动器 164

- 4.7.4 TX-KD 系列驱动器 169

第5章 IGBT 保护电路设计 176

- 5.1 IGBT 保护电路 176

- 5.1.1 IGBT 过电压保护电路 176

- 5.1.2 IGBT 过电流保护 180

- 5.1.3 IGBT 短路保护电路 190

- 5.1.4 IGBT 过电流保护方案设计 193

- 5.1.5 具有快速短路保护的中频电源 ... 197

- 5.2 IGBT 集成保护电路 198

- 5.2.1 HL601A 厚膜集成电路 198

5.2.2 JP20 系列 IGBT 保护扩展模块	201	6.2 IGBT 失效分析及安装方法	236
5.3 IGBT 缓冲保护电路	203	6.2.1 IGBT 失效分析	236
5.3.1 缓冲保护电路分类及设计	203	6.2.2 IGBT 模块的安装、接线与 保存	240
5.3.2 IGBT 无损吸收电路	207	6.3 IGBT 应用电路实例	243
5.3.3 缓冲电路的模型	208	6.3.1 低功率 IGBT 应用电路实例	243
5.3.4 C-2D 和 C-L-2D 型无源无损 缓冲电路	212	6.3.2 高功率器件在逆变电路中应用 实例	246
第 6 章 IGBT 应用电路实例	215	6.3.3 高功率器件在变频电源中应用 实例	251
6.1 IGBT 的选择与散热设计	215	6.3.4 IPM 在电能变换电路中应用 实例	257
6.1.1 IGBT 的选择	215	参考文献	271
6.1.2 IGBT 的散热设计	219		
6.1.3 功率模块热设计中的常用方法	225		
6.1.4 IGBT 的电磁兼容性	232		

第1章 IGBT 的发展历程与发展趋势

1.1 IGBT 的发展历程

1.1.1 电力电子器件的发展

1. 功率半导体技术

功率半导体技术是电力电子技术的基础与核心,随着微电子技术的发展,以栅控功率器件与智能功率集成电路为代表的现代功率半导体技术从20世纪80年代以来得到了迅速发展,进而极大地推动了电力电子技术的进步。而电力电子技术的不断进步反过来又促使功率半导体技术向高频、高温、高压、大功率及智能化、系统化的方向发展。电力电子技术的发展动力来源于各种应用的发展,电力电子技术在其发展的头二、三十年中(20世纪60~80年代)主要应用于工业和电力系统。近一、二十年来,由于4C(Communication—通信、Computer—计算机、Consumer—消费电器、Car—汽车电子)产业的迅速发展,电力电子技术的覆盖面也有了很大的变化,已覆盖了关系到国家科技发展的多个领域。

功率半导体器件的发展为上述各种新应用的发展提供了实现的可能性,功率半导体器件的发展已经迈出了两大步:第一步是各种类型的晶闸管,这是电力电子技术头二、三十年发展的基础;第二步是各种类型的MOS(Metal—Oxide—Semiconductor,金属—氧化物—半导体)器件,它为4C产业的发展提供了扎实的基础。当前功率半导体器件的发展正在迈出第三步,即功率半导体器件(电力电子器件)和微电子器件的紧密结合。表现为下述三个方面:

1) 新型功率半导体的芯片制造技术已和集成电路制造技术十分接近,都属于亚微米甚至向深亚微米技术发展。

2) 功率半导体的封装技术越来越趋近于微电子器件,如近年来集成电路封装所采用的球栅阵列(BGA)等技术已引入到功率半导体的外壳封装技术上。但功率半导体的封装仍保持其原有特色,如为了更好地散热而采用的传统大功率器件的双面散热技术。

3) 高电压的大功率半导体器件与低电压集成电路集成在同一芯片中,或是同一封装中,功率半导体器件的封装技术已形成了向在一个封装中具有多芯片模块(MCM, Multi-chip Module)发展的趋势。这些最新进展促使各种电力电子装置的电气性能更优,体积更小,效率及可靠性更高;更有利于实现生产的自动化和规模化,从而降低成本,更宜于推广应用。

信息电子或微电子不仅是电力电子技术发展的合作伙伴,在工艺上互通有无,而且也是电力电子的主要用户。从某种意义上说,正是信息电子技术对电源和功率不断提出高、精、尖的要求,才促成了功率半导体器件和技术的快速发展。提高功率转换、传送和控制的效率,一直是电力电子技术所追求的目标,是电力电子学的主要特征之一,也是这门技术学科

与信息电子学在技术上的主要区别。对于信息处理用的低电平电路,降低功耗一直是个大课题,而效率往往并不是它的重要话题,然而,对于电力电子技术中的功率转换电路,不能容忍其效率低于 85%。如今,功率转换的效率可以达到 90% 以上。然而,人们继续从功率器件和系统两方面努力,进一步提高它的效率。效率高,则功率损耗低,也即减少了能量消耗,现在全世界都在关注节能问题。同时,效率高,损耗低,可以降低对散热的要求,可以缩小散热器的体积,甚至可以不用散热装置,这样可以减少整机的体积、重量,间接地又提高了整机设备的可靠性、并降低其成本。

电力电子技术的发展又表现为功率半导体器件在功率变换中的广泛应用,近年来的发展表现十分强劲,以致出现一个新的术语去描述它,即所谓功率管理。它的内涵不同于功率变换,而是一种更为扩展和准确的描述。如广泛应用的功率因数校正(PFC, Power Factor Correction)技术,显然用功率管理来描述更为恰当,当前很多论文及杂志都已采用了这个名词去描述电力电子技术的这一最新特征。

2. 功率半导体器件的发展阶段

功率半导体器件经过了 50 多年的发展,在器件制造技术上不断提高,已经历了以晶闸管为代表的分立器件,以可关断晶闸管(GTO, gate turn-off thyristor)、巨型晶体管(GTR, gigantic transistor)、功率 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transist, 金属-氧化物-半导体场效应晶体管)或 IGBT 为代表的功率集成器件(Power Integrated Devices, PID),以智能化功率集成电路(Smart Power Integrated Circuit, SPIC)、高压功率集成电路(HVIC, high voltage integrated circuit)为代表的功率集成电路(Power Integrated Circuit, PIC)等三个发展时期。具体可分为四个阶段。

第一阶段:以整流管、晶闸管为代表的发展阶段,其在低频、大功率变流领域中的应用占有优势,很快便完全取代了汞弧整流器。

第二阶段:以 GTO、GTR 等全控器件为代表的发展阶段,虽仍属电流型控制模式,但其应用使变流器的准高频化得以实现。

第三阶段:以功率 MOSFET、IGBT 等电压型全控器件为代表的发展阶段,可直接用 IC 进行驱动,高频特性更好,在此阶段器件制造技术已进入了和微电子技术相结合的初级阶段。即在电力电子器件与电子器件发展的道路上,经历了一段时间的各自研发之后,又走到互相渗透、互相推进创新的阶段。

第四阶段:以 SPIC、HVIC 等功率集成电路为代表的发展阶段,使电力电子技术与微电子技术更紧密地结合在一起,是将全控型电力电子器件与驱动电路、控制电路、检测电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起的高度智能化的功率集成电路。它实现了器件与电路的集成,强电与弱电、功率流与信息流的集成,成为机和电之间的智能化接口,机电一体化的基础单元,预计功率集成电路(SPIC)的发展将会使电力电子技术实现第二次革命,进入全新的智能化时代,这一阶段还处在不断的发展中。

图 1-1 所示为各种主要功率半导体器件,暂且把功率半导体器件分为三类:即传统的双极性器件,功率 MOSFET 及其相关器件,特大功率器件等。从晶闸管靠换相电流过零关断的半控器件发展到 PID、SPIC,通过栅极或栅极控制脉冲可实现器件导通与关断的全控器件,从而实现了真正意义上的“可控硅”。在器件的控制模式上,从电流型控制模式发展到电压型控制模式,不仅大大降低了栅极的控制功率,而且大大提高了器件导通与关断的转换

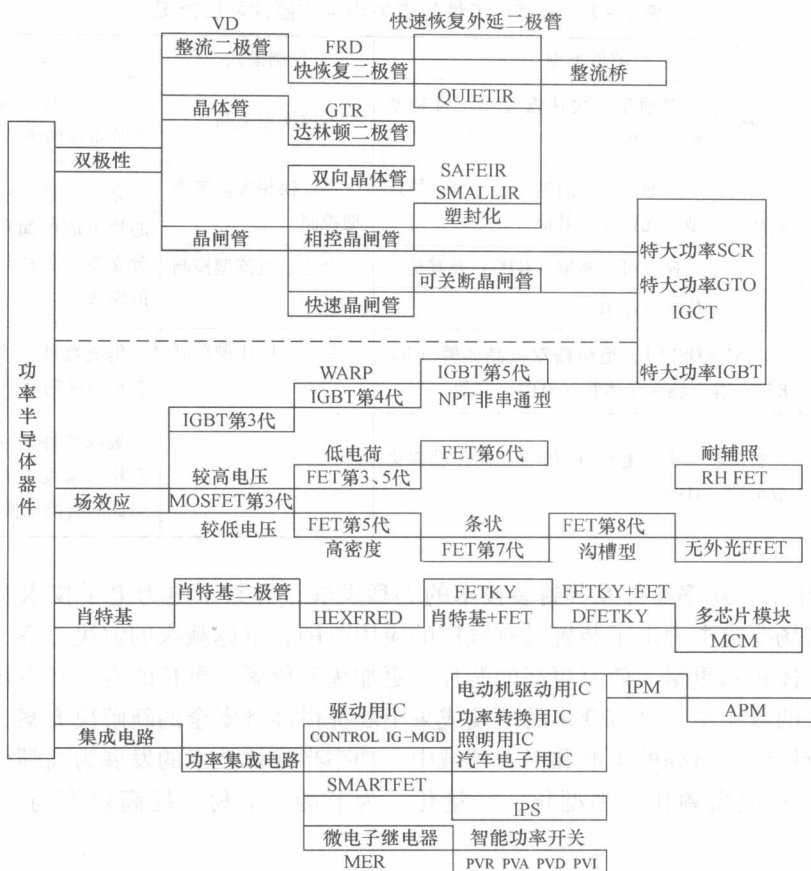


图 1-1 功率半导体器件概貌

速度,从而使器件的工作频率由工频→中频→高频不断提高。目前,正向着大容量、高频率、易驱动、低损耗、模块化和复合化方向发展。

目前,应用中压大功率领域的电力电子器件,已形成 GTO、IGCT (Integrated Gate Commutaed Thyristors, 集成门极换流晶闸管)、OGBT、IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor, 增强注入栅晶体管) 相互竞争不断创新的技术市场,在大功率 (1MW), 低频率 (1kHz) 的传动领域,如电力牵引机车领域, GTO、IGCT 有着独特的优势,而在高载波频率的应用领域, IGBT、IEGT 有着广阔的发展前景,在现阶段中压大功率应用领域将由这四种电力电子器件构成其主流器件。

在器件结构上,从分立器件发展到由分立器件组合成功率变换电路的初级模块,继而发展为功率变换电路与触发控制电路、缓冲电路、检测电路、保护电路等组合在一起的智能模块。功率集成器件从单一器件发展到模块的速度更为迅速,今天已经开发出具有智能化功能的 IPM。具有代表性的电力半导体器件与模块的发展概况见表 1-1。

表 1-1 具有代表性的电力半导体器件发展概况

发展历程	器件类型		控制模式	结构特点
第一代 分立器件（DD）	整流管	普通型、快速恢复型、肖特基型、其他	不控换相关断	分立器件，或几个分立器件芯片组成的模块
	晶闸管	普通型、双向型、逆导型、快速型、光控型、其他	半控换相关断电流型控制	分立器件，或几个分立器件芯片组成的简单模块；或几个分立器件芯片与辅助电路组成的模块
第二代功率 集成器件（PID）			栅极可关断型（GTO）及其他	全控、电流型控制
	巨型晶体管（GTR）			
	功率 MOSFET、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、静电感应晶体管（SIT）、其他		全控、电压型控制	集成器件，或几个集成器件芯片与辅助电路组成的模块
第三代功率 集成电路（PIC）	智能功率集成电路（SPIC）、高压功率集成电路（HVIC）			集成器件，或几个集成器件芯片与辅助电路、智能化电路组成的智能化模块

最近 20 年来, 功率器件及其封装技术的迅猛发展, 导致了电力电子技术领域的巨大变化。当今的市场要求电力电子装置具有宽广的应用范围、量体裁衣的解决方案、集成化、智能化、更小的体积和重量、效率更高的芯片、更加优质价廉、更长的寿命和更短的产品开发周期。在过去的数年中, 已有众多的研发成果不断提供经济安全的新解决方案, 从而将功率模块大量地应用到一系列的工业和消费领域中。功率半导体技术的发展为高频变换产品的开发, 为变流器实现高频化、小型化、轻量化, 为节能、节材、提高效率与可靠性奠定了基础。

1.1.2 IGBT 的发展

1. IGBT 的发展历程

1979 年的 MOS 栅功率开关器件是 IGBT 概念的先驱, 这种器件表现为一个类晶闸管的结构 (P-N-P-N 四层组成), 其特点是通过强碱湿法刻蚀工艺形成了 V 形槽栅。

20 世纪 80 年代初期, 用于功率 MOSFET 制造技术的 DMOS (double-diffused metal-oxide-semiconductor, 双扩散金属-氧化物-半导体) 工艺被采用到 IGBT 中来。在那个时候, 硅芯片的结构是一种较厚的 NPT (非穿通) 型设计。后来, 通过采用 PT (穿通) 型结构的方法得到了在参数折衷方面的一个显著改进, 这是随着硅片上外延技术的进步, 以及采用对应给定阻断电压所设计的 N^+ 缓冲层而进展的。由于功率垂直平面型双扩散金属氧化物半导体 (Vertical Planar Double-Diffused MOS, VDMOS) 的发展遇到了提高电压与降低导通电阻之间的尖锐矛盾, RCA 公司、GE 公司、摩托罗拉公司几乎同时研制出了 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)。IGBT 是在功率 MOSFET 的阳极加入 P^+ 层, 即 IGBT 的集电极侧为 P^+ 层, 从而增加了一个 P^+N 结, 因而工作时在载流子漂移区引入电导调制效应, 从而克服高压工作与导通电阻的矛盾, 其导通电阻比普通的功率 MOSFET 降低了 10~20 倍。由于这种结构而产生的寄生 PNPN 晶闸管, 在特定条件下 (如过电流) 导通时, 会产生锁定现象, 从而失去自关断能力, 因而该结构在 20 世纪 80 年代中期被 500V/25A 级的无锁定器件所代

替,并使 IGBT 的应用范围得以迅速推广。几年当中,这种在采用 PT 设计的外延片上制备的 DMOS 平面栅结构,其设计规则从 $5\mu\text{m}$ 发展到 $3\mu\text{m}$ 。

20 世纪 90 年代中期,沟槽结构 IGBT 采用硅干法刻蚀工艺技术,但仍然是穿通型芯片结构。沟槽结构 IGBT 的重要改进是在通态电压和关断时间之间进行了折衷设计。

硅芯片的垂直结构也得到了急剧的转变,先是采用非穿通结构,继而变化成弱穿通(LPT)结构,这就使安全工作区(SOA)得到同表面栅结构演变类似的改善。

这次从穿通型技术发展到非穿通型技术,是最基本的,也是很重大的概念变化。这就是:穿通技术会有比较高的载流子注入系数,而由于它要求对少数载流子寿命进行控制致使其输运效率变坏;非穿通技术则是基于不对少数寿命进行控制而有很好的输运效率,不过其载流子注入系数却比较低。进而言之,非穿通技术又被弱穿通技术所代替,它类似于所谓的“软穿通”(SPT)或“电场截止”(FS)型技术,这使得 IGBT 器件的“成本-性能”的综合效果得到进一步改善。

1996 年,CSTBT(载流子储存的沟槽栅双极晶体管)使第 5 代 IGBT 模块得以实现,它采用了弱穿通(LPT)芯片结构,又采用了更先进的宽元胞间距设计。目前,包括一种“反向阻断型”(逆阻型)功能或一种“反向导通型”(逆导型)功能的 IGBT 器件的新概念正在进行研究,以求得进一步优化。

在 IGBT 的发展过程中,主要的研究课题是改善饱和电压和开关特性的折衷关系,为降低饱和电压采用的主要技术有栅极氧化膜的最佳化、单胞尺寸的微细化和最佳化、降低关断电阻的新结构、新的寿命控制法。为降低下降时间所采用的主要技术有 N^+ 缓冲层、 P^+ 集电极层的浓度和厚度最佳化、新的寿命控制法。通过上述技术的应用使 IGBT 从第 1 代进入第 2 代,其饱和电压、下降时间都比第 1 代降低了 30% 以上。日立公司采用了全自对准技术,使阴极部分的 N^+ 区实现微细化,导通电阻降低了 $1/3$ 。闭锁电流由以前的 $300\text{A}/\text{cm}^2$ 改善至 $1100\text{A}/\text{cm}^2$ 。三菱公司引入阳极-发射极短路的方法,使 N^- 漂移区内储存的电子由阳极短路部分排除到外部,缩短了关断时间,得到在没有寿命控制的情况下,关断时间由 12ms 缩短到 0.19ms 。第 2 代 IGBT 的关键技术是寻求图形或片子的最佳化;2.5 代产品主要是抑制寄生器件;第 3 代引入了微细化工艺来改善 IGBT 的综合特性;第 4 代采用了沟槽技术降低饱和电压;第 5 代产品将实现有选择的寿命控制,饱和电压和关断下降时间将降到 $1.5\text{V}/0.1\text{ms}$ 。第 3 代产品比第 2 代功耗降低了 20%。开发的第 4、5 代产品其主要特征为较低的通态电压、较短的关断时间、低损耗、高频率、无闭锁。第 4 代器件中采用沟槽结构,通过降低功率 MOSFET 部分的沟道电阻,改善饱和电压,将比第 3 代器件功耗可再减小 20%。

IGBT 在 20 世纪 80 年代诞生,在 20 世纪 90 年代初进入实用化。与其他电力电子器件相比,IGBT 具有高可靠性、驱动简单、保护容易、不用缓冲电路、开关频率高、电压型驱动、驱动功率小、开关速度高、饱和压降低以及可耐高电压、大电流等一系列应用上的优点,并可用 IC 来实现驱动和控制,进而发展到把集成 IGBT 芯片、快速二极管芯片、控制和驱动电路、过电压/过电流/过热/欠电压保护电路,钳位电路以及自诊断电路等封装在同一绝缘外壳内的 IPM,为电力电子设备的高频化、小型化、高可靠性和高性能奠定了器件基础。为了达到这些高性能,采用了许多用于集成电路的工艺技术,如外延技术、离子注入、精细光刻等。要提高 IGBT 的耐压能力,势必增加导通电阻,从而妨碍器件在高电压、大电流范围的应用。针对这些缺陷,近几年来,IGBT 的性能提高很快,额定电流已达数百安培,

耐压达 1500V 以上, 而且还在不断提高。由于 IGBT 器件具有 PIN 二极管的正向特性, P 沟道的 IGBT 的特性不比 N 沟道的 IGBT 差多少, 这非常有利于在应用中采取互补结构, 从而扩大其在变流和数字控制技术领域中的应用。IGBT 器件已成为当前在工业领域应用最广泛的电力半导体器件。其硬开关频率达 25kHz, 软开关频率可达 100kHz。而新研制成的霹雳 (Thunderbolt) 型 IGBT, 其硬开关频率可达 150kHz, 在谐振逆变软开关电路中可达 300kHz。

到目前为止美国和日本生产的 IGBT 产品已系列化, 从 600V/8A ~ 1200V/600A 的器件已产品化, 耐压为 1800V 的器件也研制成功。日本富士通公司研制出了 2500V、1200A 的 IGBT。IGBT 在功率半导体器件市场上的份额日趋增大, 提高功率控制容量和集成化、智能化、高频化、低损耗是 IGBT 的主要发展方向。目前, IGBT 主要的生产厂商有日本东芝公司、富士通公司、三菱公司、日立公司; 德国的西门子公司; 美国的国际整流器公司。

IGBT 的未来发展趋势有两个方向, 一是超大功率 IGBT 模块, 二是超快速 IGBT。由于 IGBT 较功率 MOSFET 有着更大的电流密度 (同等输出功率的 IGBT 与功率 MOSFET 相比, IGBT 的芯片面积只有功率 MOSFET 的 40%), 且 IGBT 内部没有寄生的反向二极管, 这使得 IGBT 的效率更高、应用更灵活。在中等电压范围内 (370V ~ 600V), IGBT 已应用到了 150 ~ 180kHz 的频率范围 (如美国 INTERSIL 公司的 SMPSIGBT 系列和 IR 公司的 WARP-SPEEDTMIGBT 系列)。

2. IGBT 的基本特点

IGBT 凝聚了高电压大电流晶闸管制造技术和大规模集成电路微细加工技术的精华, 表现出很好的综合性能。IGBT 最大的优点是无论在导通状态还是短路状态都可以承受电流冲击, 而使其适用于并联应用, 由于本身的关断延迟时间很短, 易于实现器件的串联。尽管 IGBT 模块在大功率应用中非常广泛, 但其有限的负载循环次数使其可靠性成了问题, 其主要失效机理是阴极引线焊点开路和焊点较低的疲劳强度, 另外, 绝缘材料的缺陷也是一个问题。

IGBT 实际上是一种典型的双极 MOS 复合型功率器件, 在功率 MOSFET 工艺技术基础上的产物。IGBT 既具有功率 MOSFET 的高速开关及电压驱动特性, 又具有双极晶体管的低饱和电压特性及易实现较大电流的能力, 是近年来电力电子领域中最令人注目及发展最快的一种器件。IGBT 将 BJT (bipolar junction transistor, 双极结型晶体管) 的电导调制效应引入到 VDMOS 的高阻漂移区, 大大改善了器件的导通性, 同时它还具有功率 MOSFET 的栅极高输入阻抗。开通和关断时均具有较宽的安全工作区, IGBT 的应用范围基本上可替代了传统的晶闸管 (SCR)、可关断晶闸管 (GTO)、双极结型晶体管 (BJT) 等器件。

IGBT 采用了纵向二次扩散的 N 沟道结构, 在 P⁺ 衬底上生长 N 型漂移层, 然后用与功率 MOSFET 相似的工艺在漂移层上形成 DMOS 栅结构制作而成的。初看起来 IGBT 是由 PNP 和 NPN 两个晶体管组成的晶闸管, 但由于其中的 NPN 晶体管不起作用, 因此实际上 IGBT 等效于 N 沟道功率 MOSFET 作为输入级, PNP 晶体管作为输出级的 MOS 驱动的达林顿晶体管。IGBT 的基本工作原理为在栅极发射极之间加上足够大的正向电压, 使表面功率 MOSFET 导通。由于集电极侧的 P⁺ 层和 N⁻ 层之间的正向偏置, 产生由 P⁺ 层向 N⁻ 层的空穴注入。与注入空穴的正电荷等量的电子集中于 N⁻ 层, 使 N⁻ 层的电阻减小 (电导率调制), IGBT 导通。当栅极—发射极之间的电压降低, 表面功率 MOSFET 关断, 无空穴注入, 已注入的空穴因寿命终止而减少, 残留的空穴成为向 P⁺ 层直接流出的电流, 此过程结束时达到

关断状态。IGBT 的静电特性基本上与功率 MOSFET 相同,其动态特性也类似于功率 MOSFET。但由于有空穴注入,所以 IGBT 有拖尾电流存在。

IGBT 还具有功率晶体管漂移区电导调制、导通损耗低的特点,且比功率 MOSFET 有着更大的电流密度、更高的功率容量和较高的开关频率、更宽的安全工作区。这些优势使 IGBT 在 600V 以上中等电压范围内成为主流的功率器件,且正逐渐向高压大电流领域发展,挤占传统 SCR、GTO 的市场份额。在器件研究方面,研究人员着重对 IGBT 正向导通时漂移区少数载流子浓度与分布控制的所谓“集电极工程”与 IGBT 压接式封装技术方面进行研究。商业化的 IGBT 已发展成系列,电流范围包括从 2A 的 IGBT 单管到 2400A 的 IGBT 模块,耐压范围涵盖 370 ~ 4500V。EVPEC 公司生产的 600A/6500V 的 IGBT 模块已获得实际应用,8000V 的 IGBT 已在 ABB 公司研制成功。

IGBT 是新型电力电子器件的主流器件之一,IGBT 在设计上将 MOS 和双极型晶体管结合起来,在性能上兼有双极型器件压降小、电流密度大和 MOS 器件开关快、频率特性好的双重优点;在制造业上基于在高压、大电流的晶闸管制造技术基础上采用了集成电路微细加工技术。由于 IGBT 具有功率 MOSFET 和大功率晶体管 (GTR) 的双重优点,所以被认为是电力电子最具代表性的器件,甚至有人称:“21 世纪是 IGBT 的时代”。IGBT 是一种电压驱动元件,因而栅极驱动电路简单,易于驱动和保护电路的设计,因 IGBT 有较高的频率 (开关),是目前 100kHz 以下各种类功率变换器中应用最普遍和使用的最多的功率器件。IGBT 最成功的应用是交流电动机调速和低压变频器、逆变器,尤以变频器调速最具代表性。目前,市场销售的低压变频器不管是哪一个国家、公司的产品,功率器件几乎都是 IGBT。目前,IGBT 的最高水平为单管:3000A/5000V;模块:1200A/3300V。从器件不串不并的前提出发,IGBT 在低于 1000kW 的功率范围有着广阔的市场。

3. 第 4 代 IGBT 的基本特点

目前,西门子公司、EVPEC 公司已可提供电流从 10 ~ 2400A,电压范围为 600 ~ 3300V 的 IGBT 模块,以 1.2kA/3.3kV 的 IGBT 为例,其栅极—发射极电压仅为 15V,触发功率低、关断损耗小、 di/dt 、 dv/dt 都得到有效的控制。当前高压 IGBT 的研制和应用水平为 600 ~ 800A/6.5kV,工作频率为 18 ~ 20kHz,在工艺上,高压 IGBT 开发主要采取以下技术。

(1) 沟槽 (Trench) 结构

同各种功率半导体器件一样,IGBT 向大功率化发展的内部动力也是在减小通态压降和增加开关速度 (降低关断时间),在常规的 1 ~ 2 代 IGBT 中,其 MOS 沟道是平行于硅片表面的。它的导通电流由两部分组成: MOS 分量 I_{MOS} 和晶闸管分量 I_{SCR} ,为防止闩锁 (Latch-up) 效应,其 MOS 分量必须占主导。 I_{MOS} 流通途径中不可避免地存在一个位于栅极下方、夹在 P 型基区中间的电阻 R_{JFET} (结型场效应晶体管 JFET),由于平面结构的 IGBT 栅极处于表面,受到微细加工技术水平的限制难以降低和消除 R_{JFET} 的影响。 R_{JFET} 成为提高频率特性、缩小通态压降的障碍。第 4 代 IGBT 采用特殊的工艺制成沟槽结构,挖槽结构是在芯片内部,采用微细化加工技术。为了减少 MOS 部分的沟道阻抗,挖掉了 R_{JFET} ,把 MOS 沟道移到垂直于硅片表面的位置,元胞尺寸可减少到 20%。这样可提高硅片利用率,减小通态压降,也为其频率参数的改善创造了新的可能性。由折衷特性可知,用挖槽结构只要 35% 的芯片面积就可以实现平面结构 (100% 芯片) 的特性。今后随着微细加工技术的进步以及新的衬底材料的采用,可以实现更低的损耗、更高效率。

(2) (NPT) 结构

非穿通 (NPT) IGBT 采用 N 型 Si 衬底, N^- 区厚度是穿通 (PT) 结构的 1.5 ~ 2 倍, 而集电区厚度是穿通 (PT) 结构的 1/60。因而下降时间短, 开关损耗小, 同一芯片尺寸和同一电流额定值的 NPT 结构 IGBT (75A/1200V) 的关断损耗为 PT 型 IGBT 的 60%, 与功率 MOSFET 相同, NPT 结构的 IGBT 芯片具有正电阻温度系数、易于并联使用, 有长的 N^- 区, 易于实现高电压, 600A/4500V 的 NPT 结构 IGBT 模块已用于机车牵引, 芯片热阻小, P^+ 发射区是“超薄”的 (只有几微米)。而 PT 结构 IGBT 发射区厚度大于 300 μm 。1200V 的 NPT 结构比 PT 结构 IGBT 的热阻下降 40%。采用 NPT 结构取代 PT 结构, 这是 IGBT 大功率化的必由之路。

(3) IGBT 高频化

一段时间以来, IGBT 的工作频率限制在 20kHz 以下, 在采用软开关拓扑的电路中最多可工作到 50kHz 以下, 1998 年在第 4 代 IGBT 技术的基础上, 美国 IR 公司 (WARP 系列) 和 APT 公司 (GT 系列) 开发了命名为霹雳型 IGBT 的新器件, 由二维集成转向三维集成。其额定电压达到 600V, 额定电流为 0 ~ 100A。其硬开关工作频率可达 150kHz, 谐振逆变软开关电路可达 300kHz。它的开关特性已接近功率 MOSFET, 而电流密度则为功率 MOSFET 的 2.5 倍, 即相同电流时它的硅片面积大大减小, 故成本有所降低。

(4) 逆导型 IGBT 和双向 IGBT

逆导型 IGBT 和双向 IGBT 是为适应不同应用线路的需要而研制的 IGBT 派生器件。

4. 新技术动向

(1) 微细加工技术

对于功率 MOSFET 的研究, 耐压与通电阻已接近理论极限。采用微细加工制作的平面型 IGBT, 其单元尺寸大大减少。利用微细加工技术制作的槽栅, 其沟道电阻与平面型相比要小近一半 (对 60V)。微细加工的挖槽结构还有效地改善了 IGBT 的性能, 低的沟道电阻有利防止 NPN 寄生双极晶体管的误动作, 实现 IGBT 高速、高耐压的协调。微加工技术的引入使电力器件家族中增加了众多新成员。

(2) 器件的设计技术

利用器件设计技术改善电力半导体性能典型实例之一是 NPT - IGBT 和续流二极管 (FWD) 的低压降化, 新设计的 NPT 结构同 PT 结构比具有耐压能力强、器件并联运行容易、并联损耗随温度变小等一系列特点。另外, 利用数值解析、仿真, 进行工艺优化、结构优化。并研究同电路的相互作用、电流分布、发热和冷却、热应力的产生、电磁场产生、破坏解析等。

(3) 高耐压 SOI 技术

SOI (Silicon On Insulator, 绝缘衬底上的硅) 指的是 Si 基片中间存在着氧化膜结构, 氧化膜上的 Si 叫“活性层”, 下层的硅称为“台基极”, 使用的 Si 活性层厚度是 7 μm , 中间氧化膜厚度 2 μm , 可以实现 250V 高耐压。SOI 技术广泛用于功率集成和系统集成。

(4) 功率器件的智能化技术

功率器件的智能化有两个发展方向, 一是将外围电路集成于一个芯片的单片集成 (Smart - power IC)。目前, 功率仍较小, 在汽车领域有广泛的应用。其二是前面提过的 IPM。IPM 具有以下特点:

- 1) 低损耗, 采用第4代挖槽型 IGBT 的 IPM 与第三代相比损耗可降低 30%。
- 2) 可实现 PAM 控制, 电源输出范围广。
- 3) 可实现额定负载率 99% 以上的高功率因数。
- 4) 负载切换时可以抑制电压的上升率。
- 5) 具有过电压、短路、过热等保护功能。
- 6) 模块外形尺寸和安装尺寸标准化, 使模块化占用安装空间小, 安装和维护更加方便。
- 7) 适于高频应用, 谐波符合 IEC 标准。

1.2 IGBT 的发展趋势

1.2.1 IGBT 器件的研发

电力电子技术的几十年发展历史表明, 场控器件因其性能优越、控制方便等优点获得了广泛应用。尤其在解决电力公害、改善电能质量、航空航天电源、通信和计算机电源、不间断电源、高频化焊接电源和 X 光机电源、感应加热电源、超声电源、汽车电子化、智能家用电器、绿色照明工程的实施、交流电机变频调速和电动汽车、洁净发电以及传统电力电子设备的高频化改造等方面, IGBT 等场控器件都发挥着极其重要的作用。我国目前还没有属于自己知识产权的创新产品, 不能独立自主地、大规模地生产高性能的 IGBT 等场控器件。国内为数不多的器件研究单位的研究工作由于各种原因进展缓慢, 新材料和新工艺的研究更是一个薄弱环节。新材料和新工艺的研发和创新必将推动新型器件的诞生, 而新型器件的诞生或器件性能的提高都对装置性能产生重要的影响。为了提高我国电力电子产品在国际市场上的竞争能力和应付特殊环境下的危机能力, 必须强化对 IGBT 等场控制器件及其相关课题的开发和研制, 建立自己的现代电力电子器件的研发生产基地。

1. IGBT 的开关损耗与性能

在 IGBT 的研制中, 要求功率开关器件降低损耗、提高效率、提高性能。开关器件的损耗分为两类, 一类是器件的通态正常 (导通) 损耗; 另一类是从通态向断态 (从断态向通态) 转换的开关损耗。IGBT 的主要技术特性有集电极 - 发射极间饱和电压 $V_{CE(sat)}$ 特性, 开关特性 t_f (断开时间 t_{off} 和导通时间 t_{on} 之和)。IGBT 的击穿性能有闭锁性能、短路性能、 di/dt 、 dv/dt 性能。

(1) 改进开关特性的技术

为改进开关特性所研制的技术主要是使浓度与层的厚度达到最佳化, 减少成为储存载流子的空穴, 使 IGBT 特有的集电极电流拖尾减少。通过单元图形的最佳化减少输入阻抗 R_G , 使功率 MOSFET 部分栅极电荷充放电时间高速化, 在高速化功率器件的基础上所采用的技术是缩短载流子的寿命时间。作为寿命时间限制方法一般常采用重金属扩散和电子射线照射等方法, 通过寿命时间的控制可以控制 IGBT 集电极电流 I_c 的关断特性。降低功率 MOSFET 部分的栅极电容量, 可使充放电时间达到高速化。

(2) 降低 $V_{CE(sat)}$ 技术

降低 $V_{CE(sat)}$ 技术是通过浓度、层的厚度及深度的最佳化来降低电阻部分, 借助精细化,

提高单位面积的电流密度,使 L_g 与 L_s 比达到最佳化,扩大功率 MOSFET 部的反型层(沟道)单位芯片面积,减少沟道电阻。

利用开关特性的改进技术,加大寿命时间限制量,开关特性能实现高速化,在 IGBT 中, $V_{CE(sat)}$ 与开关特性 t_f 处于相关关系中,借助寿命时间控制,在该相关关系上可以找到所需要的任意工作状态。

(3) 提高性能技术

为提高 IGBT 击穿性能,采用 IGBT 提高性能的技术,抑制了 IGBT 内部寄生 NPN 晶体管工作及 IGBT 内部电场和电流的集中,使 IGBT 击穿性能得以提高。

2. IGBT 器件的系列化

IGBT 在设计上将 MOS 和双极型晶体管结合起来,在性能上兼有双极型器件压降小、电流密度大和 MOS 器件开关快、频率特性好的双重优点。在制造业上,在高电压、大电流的晶闸管制造技术基础上采用了集成电路微细加工技术。目前,国外 IGBT 公司生产的产品主要分为四类:

- 1) 单独的 IGBT: 电流 15 ~ 400A, 电压 400 ~ 1200V。
- 2) 半桥 IGBT: 电流 15 ~ 75A, 电压 500 ~ 1000V。
- 3) 全桥 IGBT: 电流 18 ~ 32A, 电压 400 ~ 500V。
- 4) 三相 IGBT: 电流 15 ~ 100A, 电压 400 ~ 1200V。

IGBT 产品已模块化,每个 IGBT 都并联续流二极管,然后以一单元、二单元、六单元形式封装在同一模块外壳内。ABB 半导体公司生产的 IGBT 模块是三相全桥式逆变模块,采用密集型封装结构系统(母线控制),安装简便,具有铜底板和无铜底板系列两种。

SPT 结构的 IGBT 具有通态电压和关断损耗可降低 20%,热阻无增加,并增加有效电流,皱纹状表面有利于散热,EMC 良好的软开关波形。目前 IGBT 的最高水平为:单管,3000A/5000V;模块,1200A/3300V,从不串不并的前提出发,IGBT 可在低于 1000kW 的功率范围内使用。

IGBT 的应用范围一般都在耐压 600V 以上、电流 10A 以上、频率为 1kHz 以上的区域。多使用在工业用电动机、民用小容量电动机、变换器(逆变器)、照相机的频闪观测器、感应加热(Induction Heating)电饭锅等领域。根据封装的不同,IGBT 大致分为两种类型,一种是模压树脂密封的三端单体封装型,从 TO-3P 到小型表面贴装都已形成系列;另一种是把 IGBT 与 FWD(Free Wheel Diode,续流二极管)成对地(2 或 6 组)封装起来的模块型,主要应用在工业上。模块的类型根据用途的不同,分为多种形状及封装方式,都已形成系列化。

目前,IGBT 制造上主要有两种结构即 PT 结构(PT 型)和 NPT 结构(NPT 型),IGBT 产品也有多种形式,其模块化结构有一单元(一个 IGBT 与一个续流二极管反向并联)、二单元、四单元、六单元及七单元,高压 IGBT 模块有平板和片状两类。IGBT 的使用必须满足两个条件:一是在关断过程中,集电极峰值电流必须处在开关安全工作区内(小于两倍的额定电流 I_C),二是 IGBT 的工作结温必须保持在 $T_{j(max)}$ (150℃) 以下。

(1) 六单元 IGBT 模块

小功率变频器多采用六单元结构的 IGBT 模块,其将六只 IGBT 封装在一个模块内,构成一个完整的三相逆变桥电路。最新的六单元 IGBT 模块由高速、低耗的 IGBT 芯片、检测

电路、保护电路及栅极驱动电路集成而成,其方便了用户的产品设计,减少了组装的元件数,同时,其通态损耗和开关损耗都比较低,整体散热尺寸减小,从而使整机尺寸减小,由于六单元功率模块的不断改进。以富士 FVR-E11S 变频器为例,3.7kW 高度仅为 130mm,在 7.5kW 以下一般都采用六单元结构的 IGBT 模块,目前六单元 IGBT 模块容量已达到 300A/1200V $\times$ 6,方便整机的设计与应用。

(2) 二单元模块

二单元模块目前可提供的器件为 625A/1200V 或 400A/1700V,各变换器(DC/DC、AC/DC、DC/AC)生产厂商可用这些模块的不同组合生产出 11~315kW 的通用变换器。EVPEC 公司采用沟槽结构的 IGBT 通态压降低于 2V,关断损耗减少了 20%,而其经济封装结构降低了变换器生产成本,方便安装,简化了整机生产。富士 P 系列 IGBT 采用 NPT 工艺,通态压降与温度成正比,1400V 的 IGBT 比普通 IGBT 有更大的安全工作区,低损耗,软开关,大大降低了 EMI (Electro Magnetic Interference, 电磁干扰) 噪声。采用富士电机新一代 IGBT 生产的 FRNG11/P11 系列变频器的容量为 0.2~400kW,具有较高的可靠性。

(3) 高压 IGBT

目前欧洲半导体与电子(优派克)公司(European Semiconductors and Electronics Company, EUPEC)已可提供 FZ1200R33KF2 (1200A/3300V) 系列高压 IGBT (HV-IGBT),其主要特点是采用了 NPT 结构,使 IGBT 关断过程中下降时间短、拖尾电流小,栅极发射极电压仅为 15V,触发功率低,关断损耗小,di/dt、dv/dt 都得到了有效控制,其 IGBT 芯片具有正电阻温度系数,易于并联,实现 IGBT 大功率化。利用计算机辅助设计优化了高压 IGBT 芯片的并联和芯片内部 RLC 网络特性;并实现了 IGBT 的内部低电感设计和 IGBT 引线等可靠性设计。随着 IGBT 技术的成熟,模块正向统一和标准化方向发展。西门子公司采用高压 IGBT 和三电平技术开发了 MV 系列中压变频器,由于采用高压 IGBT 器件,使 MV 系统结构简单紧凑,可靠性高,目前已有数十套装置已投入运行。高压 IGBT 的应用前景十分广阔,日本富士公司将最新型片状高压 IGBT 用于新干线列车的主逆变器,降低了新干线列车在运行时的电动机噪音,比相同功率的 IGBT 牵引变换装置的体积和重量减小约 1/3,比相同功率的 GTO 逆变器的体积和重量减小约 1/2。

ABB 公司采用平面低电感封装技术(FLIP)生产的内部电感只有 3nH 的 1200A/3300V 平板压接式 IGBT,其体内结构采用透明 P⁺、SPT 基区,终端采用多重平面环保护。SPT 型 IGBT 通态压降及关断损耗可减小 20%,增大了 IGBT 芯片的额定电流密度,具有软开关波形,易于并联。

(4) IR 公司的 IGBT 系列模块

IR 公司推出的全新 MTP 隔离式开关模块系列,专为大电流工业电源而设计,适用于高频弧焊电源及不间断电源(UPS)。新模块系列的额定电压为 600V 和 1200V,把高速 IGBT 和优化的二极管结合在同一封装内,可取代分立式解决方案。该系列器件中的 50MT060VLS 是一款全绝缘低侧斩波模块,内含一个 IR 超快速 IGBT 和一个具超软逆恢复电流特性的 HEXFRED 二极管。

50MT060WH 是一款全绝缘半桥式模块,内含成对的 IR-WARP 超高速 IGBT 和一个具超软逆恢复电流特性的 HEXFRED 二极管,这种双 IGBT 设计可有效地控制功率耗散和电流分配。