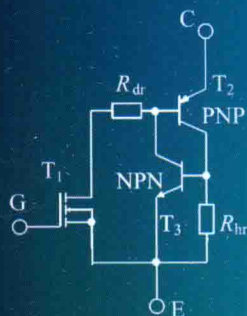
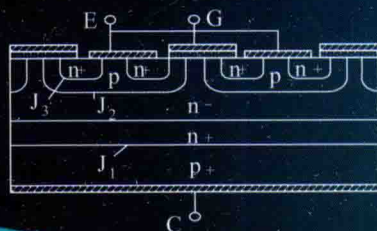


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎ 龚熙国 龚熙战 编著

高压IGBT模块 应用技术

GAOYA IGBT MOKUAI YINGYONG JISHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
电力电子新技术系列图书

高压 IGBT 模块 应用技术

龚熙国 龚熙战 编著



机械工业出版社

本书全面阐述了高压 IGBT 模块的芯片、封装制造、测试与应用技术。在应用技术中又着重介绍了高压 IGBT 模块的驱动、保护、失效分析以及在轨道牵引、高压变频、风力发电和高压直流输配电中的应用要点。

本书内容新颖,介绍了最前沿的高压 IGBT 模块制造技术和应用设计技术;内容全面,涵盖了高压 IGBT 模块产品工程的全部技术:芯片技术、封装技术、制造技术、测试技术、可靠性技术和应用技术等;注重理论与实用的结合,很多内容是基于实验室和现场应用的实测结果。

本书非常适合电力电子装置设计工程师、功率半导体应用技术人员参考和使用,无论从事哪个领域进行开发设计,本书都会有所助益。本书对在大专院校里从事电力电子技术研究的广大师生也很有帮助。同时本书介绍的封装技术、制造技术、测试技术、可靠性技术等对半导体器件研发工程师和科研管理者也有参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压 IGBT 模块应用技术/龚熙国, 龚熙战编著. —北京:
机械工业出版社, 2015. 9
(电力电子新技术系列图书)
“十二五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978 - 7 - 111 - 51423 - 7

I. ①高… II. ①龚…②龚… III. ①绝缘栅场效应
晶体管 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN386. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 206433 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: 任秀丽
封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2015 年 11 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm × 239mm · 19.5 印张 · 397 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 51423 - 7
定价: 59.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

第2届
电力电子新技术系列图书
编辑委员会

主 任: 徐德鸿

副主任: 白继彬 牛新国 康 勇 李崇坚 杨 耕

委 员: (按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈 坚	陈道炼	陈守良	陈治明
高艳霞	郭 宏	郭世明	康 勇	李崇坚
李永东	刘进军	吕征宇	牛新国	潘三博
阮新波	孙流芳	孙玉坤	王旭东	王兆安
肖湘宁	徐德鸿	徐殿国	杨 耕	杨 旭
张 波	张承慧	张卫平	张 兴	查晓明
赵善麒	赵争鸣	钟彦儒	周 波	周维维

秘书组: 陈守良 孙流芳 杨 旭 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序 言

1974 年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义, 电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用, 以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术, 几乎应用于科技、生产、生活各个领域: 电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪, 电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用, 它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电, 已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来, 也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前, 电力电子技术仍以迅猛的速度发展着, 电力半导体器件性能不断提高, 并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件, 新的技术和应用不断涌现, 其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国, 电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应, 从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此, 组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书, 以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考, 促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代, 电力电子学会曾和机械工业出版社合作, 出版过一套电力电子技术丛书, 那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近, 电力电子学会经过认真考虑, 认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此, 成立了专门的编辑委员会, 负责确定书目、组稿和审稿, 向机械工业出版社推荐, 仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

本系列图书属专题论著性质, 选题新颖, 力求反映电力电子技术的新成就和新经验, 以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际, 以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格, 作者都是在电力电子技术第一线工作的专家, 且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出, 条理清晰, 语言通俗, 文笔流畅,

便于阅读学习。

本系列书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

**第2届电力电子新技术系列图书
编辑委员会**

前 言

电能是世界上最重要的能源之一。从电网得到的工频电能需要经过转换,变成不同用途、不同性质、不同容量、不同频率的电能,才能适用千变万化的用电装置的需求。电力电子技术就是基于功率半导体器件对电能进行转换与控制的技术。功率半导体器件是电力电子技术的物质基础,也是电力电子装置的核心部件。

目前电力电子技术已经发展成为应用最广泛、受关注度最高的技术之一,并且仍在以飞快的速度发展着。这也使得功率半导体器件的市场规模越来越大,应用领域不断扩展。在功率半导体器件中占主导地位的 IGBT 模块尤其令人瞩目。目前,国内专门介绍 IGBT 模块应用技术的书籍较少,针对高压 IGBT 模块应用的专著几乎没有。为此,作者根据自己的工作经验编写了这本介绍高压 IGBT 模块应用的手册。

本书系统地阐述了高压 IGBT 模块的应用技术。全书共分为 11 章,第 1 章为概述,概括介绍了高压 IGBT 模块的关键技术、应用领域和发展趋势;第 2 章简单介绍了高压 IGBT 模块的芯片技术;第 3 章介绍了高压 IGBT 模块的封装与制造技术;第 4 章阐述了高压 IGBT 模块的动静态特性和参数及其测试方法;第 5 章阐述了高压 IGBT 模块的驱动技术,包括栅极驱动电阻、栅极钳位电路、栅极-发射极电阻和外接电容和推挽电路、 V_{CE} 检测及短路保护电路、有源钳位电路、光纤隔离电路以及 DC/DC 隔离电源;第 6 章重点分析了高压 IGBT 模块的保护技术,包括过电压保护、短路保护和过温保护,以及并联时的均流保护和串联的均压保护;第 7 章着重讲述了高压 IGBT 模块的失效原因和失效模式;第 8 章介绍了高压 IGBT 模块在轨道牵引中的应用;第 9 章介绍了高压 IGBT 模块在中高压变频器中的应用;第 10 章介绍了高压 IGBT 模块在 VSC-HVDC 中的应用;第 11 章讲述了高压 IGBT 模块在风力发电中的应用。

本书的编写参考了英飞凌公司、日立公司、三菱电机公司、ABB 公司和富士电机公司等世界知名功率半导体器件制造商的相关应用技术资料,同时参阅了大量的论著文献。

本书编写过程中,在资料收集和技术信息交流方面得到了国内外专家学者的大力支持。英飞凌公司的 Mr. Keggenhoff、三菱电机公司的仓地和博先生、CT-Concept 公司的魏炜先生、Inpower 公司的虞军毅先生在本书的编写过程中给予了多方面的大力支持,在此向他们表示衷心的感谢!非常感谢工作中的同事和朋友,与他们的技术交流让作者受益匪浅。株洲南车时代电气股份有限公司的李华先生和马伯乐先生、合肥阳光电源股份有限公司的陶磊先生、金风科技股份有限公司的高绪华先

生、上海电气集团公司的陈国栋先生、南瑞继保电气有限公司的汪涛先生、国网电科院的苗亚先生、北京交通大学的黄先进先生等都是从事高压 IGBT 模块应用的专家，他们的技术见解拓宽了作者的思路，在此一并表示感谢！

本书非常适合电力电子装置设计工程师和功率半导体应用技术人员参考和使用，无论从事哪个领域的开发设计，本书都会有所助益。同时本书对在大专院校里从事电力电子技术研究的师生也很有帮助。

由于作者水平有限，编写时间仓促，书中疏漏及错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2015 年 3 月

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第1章 概述 1

- 1.1 电力电子技术概述 1
- 1.2 功率半导体器件的发展 1
- 1.3 IGBT 模块概述 3
- 1.4 IGBT 模块的关键技术 5
- 1.5 IGBT 模块的主要应用领域 8
- 1.6 IGBT 模块的发展趋势 10
- 参考文献 14

第2章 高压 IGBT 模块的芯片技术 15

- 2.1 IGBT 的基本结构和工作原理 15
- 2.2 高压 IGBT 芯片的发展 16
- 2.3 高压 IGBT 芯片的表面栅结构 17
 - 2.3.1 平面栅 IGBT 17
 - 2.3.2 沟槽栅 IGBT 18
- 2.4 高压 IGBT 芯片的纵向结构 18
- 2.5 英飞凌最新高压 IGBT 芯片技术介绍: Trench + FS 技术 20
- 2.6 日立最新高压 IGBT 芯片技术介绍: Trench HiGT + sLiPT 技术 21
- 2.7 三菱电机最新高压 IGBT 芯片技术介绍: CSTBTTM + LPT 技术 22
- 2.8 ABB 最新高压 IGBT 芯片技术介绍: Fine planar + SPT + 技术 23
- 2.9 SiC 芯片技术 23
- 2.10 RC (逆导) IGBT 芯片技术 24
- 参考文献 25

第3章 高压 IGBT 模块的封装与制造技术 26

- 3.1 高压 IGBT 模块的封装与结构 26
 - 3.1.1 高压 IGBT 模块的封装 26

- 3.1.2 高压 IGBT 模块的内部拓扑电路 28
- 3.1.3 高压 IGBT 模块的内部结构 29
- 3.1.4 高压 IGBT 模块的构成材料 30
- 3.2 高压 IGBT 模块制造过程 34
 - 3.2.1 晶圆制备过程 34
 - 3.2.2 芯片制造过程 35
 - 3.2.3 模块组装过程 37
 - 3.2.4 模块组装完成后的测试及包装 37
- 3.3 高压 IGBT 模块的可靠性测试 39
 - 3.3.1 可靠性测试概述 39
 - 3.3.2 功率循环可靠性与热循环可靠性 42
- 3.4 高压 IGBT 模块封装的技术要求与发展趋势 45
- 3.5 各制造厂商高压 IGBT 模块型号的定义 48
- 参考文献 49

第4章 高压 IGBT 模块的动静态参数及其测试 50

- 4.1 如何阅读高压 IGBT 模块的数据手册 50
 - 4.1.1 绝对最大参数 50
 - 4.1.2 高压 IGBT 模块的推荐参数 55
 - 4.1.3 特性曲线 61
- 4.2 高压 IGBT 模块静态参数的测试方法 68
- 4.3 高压 IGBT 模块动态参数的测试方法 72
 - 4.3.1 半桥电路和双脉冲测试 72

4.3.2 高压 IGBT 模块的开通过程 测试与分析	74	5.18 栅极电压的测试方法	126
4.3.3 高压 IGBT 模块的关断过程 测试与分析	75	5.19 集成高压 IGBT 模块驱动器 介绍	127
4.3.4 高压 IGBT 模块的反向恢复 过程测试与分析	76	参考文献	130
4.3.5 FWD 的 I^2t 测试	78	第 6 章 高压 IGBT 模块的 保护	131
4.3.6 高压 IGBT 模块半桥测试平 台的构建	79	6.1 高压 IGBT 模块的过电压 保护	131
参考文献	85	6.1.1 高压 IGBT 模块关断浪涌 电压产生的原因	131
第 5 章 高压 IGBT 模块的驱动	86	6.1.2 常用直流侧电压 V_{dc} 检测 电路	132
5.1 高压 IGBT 模块驱动电路的基本 功能和设计要求	86	6.1.3 吸收电路	133
5.2 高压 IGBT 模块开通和关断过程 中的栅极电压和电流波形	88	6.1.4 降低主回路杂散电 感量 L_s	137
5.3 栅极驱动电压的选取	89	6.1.5 驱动电路采用有源钳位 抑制浪涌电压尖峰	139
5.4 栅极驱动电阻的选取	90	6.2 高压 IGBT 模块的短路保护	141
5.5 栅极输出峰值电流和驱动功率 的计算	96	6.2.1 短路与过载	141
5.6 高压 IGBT 模块驱动电路中的 DC/DC 变换器	98	6.2.2 高压 IGBT 模块的 2 种短路 模式	142
5.7 驱动电路的栅极隔离方式	102	6.2.3 高压 IGBT 模块短路能力的 评价标准	144
5.8 栅极电压钳位技术	103	6.2.4 短路故障的检测方法	145
5.9 外接栅极-发射极电阻 R_{GE} 和 电容 C_{GE}	104	6.2.5 影响短路电流大小的 因素	149
5.10 高压 IGBT 模块驱动的有源钳位 技术	106	6.2.6 降低高压 IGBT 模块短路时 栅极电压峰值的方法	151
5.11 高压 IGBT 模块驱动的 di/dt 反馈技术	111	6.3 高压 IGBT 模块的过温保护	155
5.12 高压 IGBT 模块分段开通与关断 技术	113	6.3.1 高压 IGBT 模块的功耗 计算	156
5.13 高压 IGBT 模块驱动的软关断 技术	117	6.3.2 结温的计算	161
5.14 欠电压保护电路	118	6.3.3 高压 IGBT 模块的冷却 方式	164
5.15 短脉冲抑制电路	119	6.4 高压 IGBT 模块并联应用时的 均流保护	167
5.16 死区时间	119	6.4.1 影响高压 IGBT 模块稳态 电流均衡的因素	167
5.16.1 死区效应	119	6.4.2 影响高压 IGBT 模块动态	
5.16.2 死区时间的计算方法	120		
5.17 驱动电路的布局与栅极布线	124		

电流均衡的因素	170	7.4.3 高压 IGBT 模块的过电流 损坏模式	197
6.5 高压 IGBT 模块串联应用时的 均压保护	172	7.4.4 高压 IGBT 模块的过热 损坏模式	198
6.6 高压 IGBT 模块安装时的注意 事项	176	7.4.5 功率循环失效模式	199
6.6.1 安装方法	176	7.4.6 热循环失效模式	200
6.6.2 导热硅脂的涂抹方法	176	7.4.7 RBSOA 失效模式	200
6.6.3 散热器的表面粗糙度和 平面度	178	7.4.8 SCSOA 失效模式	201
6.7 高压 IGBT 模块运输与取用时的 注意事项	179	7.4.9 RRSOA 失效模式	201
6.8 高压 IGBT 模块保存时的注意 事项	180	参考文献	202
参考文献	180	第 8 章 高压 IGBT 模块在轨道 牵引中的应用	203
第 7 章 高压 IGBT 模块的失效 原因与失效模式	181	8.1 轨道牵引中的电力电子技术 概述	203
7.1 高压 IGBT 模块失效分析概述	181	8.2 轨道牵引中的变流器主电路 拓扑	205
7.2 高压 IGBT 模块失效与否的判 定方法	184	8.2.1 电力机车和动车组车辆用牵引 变流器的主电路拓扑	206
7.2.1 用万用表简单检查高压 IGBT 模块是否损坏	185	8.2.2 电力机车和动车组车辆用辅助 变流器的主电路拓扑	206
7.2.2 通过参数测量准确判定高 压 IGBT 模块是否失效	186	8.2.3 城市轨道交通车辆用牵引逆变 器的主电路拓扑	209
7.3 高压 IGBT 模块的失效原因 分析	187	8.2.4 城市轨道交通车辆用辅助逆变 器的主电路拓扑	210
7.3.1 超出 RBSOA 导致的 IGBT 单元失效原因	188	8.2.5 牵引变流器的构成部件	212
7.3.2 超出 SCSOA 导致的 IGBT 单元失效原因	189	8.3 高压 IGBT 模块在轨道牵引中的 应用	214
7.3.3 栅极过电压导致的高压 IGBT 模块失效原因	191	8.3.1 轨道牵引变流器中高压 IGBT 模块电压电流等级的 选型	214
7.3.4 结温过高导致的 IGBT 单 元失效原因	191	8.3.2 对高压 IGBT 模块短路耐量 及 P_{Tj} 的要求	216
7.3.5 FWD 单元失效原因	192	8.3.3 对高压 IGBT 模块关断能力 的要求	217
7.4 高压 IGBT 模块的失效模式	196	8.3.4 对高压 IGBT 模块的寿命 要求	219
7.4.1 高压 IGBT 模块的 V_{CE} 过 电压损坏模式	196	8.3.5 轨道牵引对高压 IGBT 模块长期 直流稳定性的要求	223
7.4.2 高压 IGBT 模块的 V_{CE} 过 电压损坏模式	197	8.3.6 四象限脉冲整流器	223

8.3.7 轨道牵引中高压 IGBT 模块 的冷却方式	226
8.4 轨道牵引中的电动机控制 策略	227
8.4.1 异步电动机的矢量控制	227
8.4.2 异步电动机的直接转矩 控制	236
参考文献	244
第 9 章 高压 IGBT 模块在中高压 变频器中的应用	246
9.1 中高压变频器概述	246
9.2 高压 IGBT 模块在功率单元级联 中高压变频器中的应用	246
9.2.1 功率单元级联中高压变频 器的工作原理	246
9.2.2 功率单元中高压 IGBT 模块 的功耗分布	250
9.2.3 功率单元级联中高压变频 器中 IGBT 模块的选型	251
9.3 高压 IGBT 模块在二极管钳位三 电平中高压变频器中的应用	253
9.3.1 二极管钳位三电平逆变器 工作原理	253
9.3.2 二极管钳位三电平逆变器中 高压 IGBT 模块的功耗计算 方法	256
9.3.3 二极管钳位三电平逆变器中 IGBT 模块的吸收电路 设计	259
9.3.4 二极管钳位三电平逆变器的 中点电位平衡电路	262
9.3.5 二极管钳位三电平中高压变 频器中高压 IGBT 模块的 选型	266
9.3.6 二极管钳位三电平电路的 短路方式	268
9.4 中高压变频器的其他电路拓扑 简介	268
参考文献	269

第 10 章 高压 IGBT 模块在 VSC- HVDC 中的应用	270
10.1 VSC-HVDC 技术概述	270
10.2 基于高压 IGBT 模块直接串联 的两电平和三电平电压源换 流器	272
10.3 模块化多电平电压源换流器 (MMC-VSC)	274
10.3.1 模块化多电平电压源换流器 的工作原理	274
10.3.2 模块化多电平电压源换流器中 高压 IGBT 模块的选型	277
参考文献	280
第 11 章 高压 IGBT 模块在风力发 电中的应用	282
11.1 风力发电概述	282
11.2 风电变流器的主电路拓扑	284
11.2.1 双馈型风电变流器的主 电路拓扑	284
11.2.2 直驱型风电变流器的主 电路拓扑	284
11.2.3 风电变流器的构成	286
11.3 风力发电应用中对高压 IGBT 模块的要求	287
11.3.1 风电变流器中高压 IGBT 模块 的选型	287
11.3.2 风电变流器对高压 IGBT 模块 的可靠性要求	288
11.4 高压 IGBT 模块在低电压穿越中的 应用	288
11.5 基于 4500V 高压 IGBT 模块的中 压风电变流器	291
11.6 高压 IGBT 模块在高海拔风力发 电中的应用	293
11.7 高压 IGBT 模块在海上风力发电 中的应用	295
11.8 高压 IGBT 模块在风电变流器中 的失效原因分析	295
参考文献	296

第 1 章 概 述

1.1 电力电子技术概述

电力电子技术 (Power Electronics Technology) 是以电力为对象的电子技术, 是一门利用电力电子器件构成的变换装置结合控制技术对电能进行高效转换与控制的学科。对电能转换与控制的目的是使电网的工频电能转换成不同容量、不同频率、不同性质的电能, 以适应各种各样的用电负载。

电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制电路三大部分, 涉及控制科学、材料科学、计算机科学等诸多学科, 是一门高新技术。电力电子技术是以计算机为核心的信息产业和以电力装置为对象的传统产业的接口, 是用弱电控制强电的科学。人们通常用图 1-1 所示的倒三角形来描述电力电子技术与其他学科的关系。

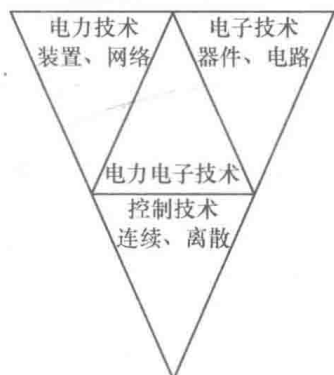


图 1-1 描述电力电子技术与其他学科关系的倒三角

电力电子技术已经渗透到工业应用、交通运输、空间技术、国防科技、医疗卫生、新能源环保以及人们日常生活的各个领域, 正深刻改变着人们的生活。目前, 电力电子技术仍在以迅猛的速度发展着。

1.2 功率半导体器件的发展

电力电子器件也称功率半导体器件或电力半导体器件, 一般是指额定电流超过 1A 的半导体器件。广义上的功率半导体按功能可以划分为整流器件、自关断器件和功率 IC。整流器件包括不具备可控开关能力的功率二极管和仅有开通能力而无可关断能力的晶闸管。自关断器件指既具有开通也具有自关断能力的三端器件, 如 GTO、GTR、MOSFET、IGBT 等。这类器件也称为全控型器件。功率 IC 指内置驱动和保护功能的功率芯片。功率半导体器件是电力电子技术发展的物质基础和核心支撑。

1956 年晶闸管 (SCR) 问世, 标志着电力电子器件的开端。到了 20 世纪 70 年代, 传统的电力电子器件已经由普通的晶闸管派生出了快速晶闸管、逆导晶闸管 (RCT)、双向晶闸管 (TRIAC)、不对称晶闸管 (ASCR) 等器件, 从而形成了一

个晶闸管大家族。SCR 器件曾经被广泛应用于整流和斩波装置，一度在经济和国防领域中占据重要地位。但是 SCR 只能通过栅极控制开通，不能控制关断，是一种半控型器件。要想关断这种器件只能附加各种电容、电感和开关器件，组成强迫换流电路，导致电力电子装置的体积增大、质量增加。而且 SCR 的开关频率较低，一般情况下小于 400Hz，因而在工业应用领域逐渐缩小，步入了衰退期。但是，由于 SCR 具有高电压、大电流特性，在超大容量电力电子装置中仍具有重要地位。

20 世纪 70 年代，人们开发出了 1200V/75A 的门极可关断晶闸管（Gate Turn off Thyristor, GTO）。此后，GTO 的电压、电流等级不断升高，到 20 世纪 80 年代研制出 4500V/2500A 的 GTO 元件；到 20 世纪 90 年代已经研制出 6000V/6000A 的 GTO 元件，满足了人们对大功率电力电子器件的需求。相比于 SCR，以 GTO 构成的电力电子装置不再需要强迫换流电路，体积大幅度减小，质量大为减轻，损耗明显降低。因此，GTO 很快被应用到电力机车和输配电领域，在许多高电压、大电流领域取代了传统晶闸管。

20 世纪 80 年代，在中小容量电力电子装置中，晶闸管（SCR）的市场地位逐渐被电力晶体管（GTR）取代。GTR 是一种双极型大功率的自关断功率半导体器件。GTR 具有饱和压降低、开关时间短和安全工作区宽的特点，在电机控制和电源装置中得到了广泛应用。GTR 具有负温度系数特性，容易导致器件的二次击穿。

在 20 世纪 80 年代得到快速发展的另一种功率半导体器件是功率场效应晶体管，也称功率 MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）。功率 MOSFET 是场控型半导体器件，因而驱动功率小，驱动电路简单。功率 MOSFET 具有正温度系数特性，能避免 GTR 器件所具有的二次击穿问题。此外，功率 MOSFET 开关速度很快，工作频率很高，适用于开关频率较高的电力电子装置。基于上述优点，人们曾经预期功率 MOSFET 会完全取代 GTR。但是，功率 MOSFET 的缺点制约了它的应用范围。功率 MOSFET 的一个主要缺点是通态电阻较大，而且会随着器件耐压的提高而加大，由此引起的损耗是大功率电力电子装置不能承受的。因此，功率 MOSFET 的主要应用领域是电压较低、容量较小、开关频率较高的电力电子装置，在这些领域它已经取代 GTR。

1982 年，RCA 公司和 GE 公司研制出了复合型功率半导体器件-绝缘栅双极型晶体管。绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）是将功率 MOSFET 和 GTR 集成在一起的复合器件，因而既具有功率 MOSFET 的高速开关特性和栅控特性，又具有 GTR 的低饱和压降特性和大电流实现能力，是近乎理想的功率半导体器件，也是近 20 年来电力电子领域中发展最快的功率半导体器件。

在 IGBT 高速发展的同时，人们并没有停止对晶闸管和 GTO 器件进行改进的脚步。集成门极换流晶闸管（Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT）就是一种改进的 GTO 器件。与普通 GTO 一样，IGCT 具有高电压、大电流的特性。但不同于普通 GTO，IGCT 具有开关频率高、驱动功率小的优点，这些恰恰也是 IGBT 的优

点。因此，IGCT 的特性介于 GTO 和 IGBT 之间。

电力电子器件的发展日新月异，但在可预见的未来，IGBT 仍将占据功率半导体器件的优势地位，其应用领域也将得到进一步扩展。

1.3 IGBT 模块概述

1. IGBT 模块

IGBT 元件通常可以分为分立式 IGBT (Discrete IGBT) 和 IGBT 模块 (IGBT Module)，如图 1-2 所示。分立式 IGBT 也称 IGBT 单管，通常具有 TO 封装形式。与分立式 IGBT 不同，IGBT 模块是指将两个或两个以上的芯片按照一定的电路进行连接并用绝缘树脂进行封装的元件。在一个 IGBT 模块里，数个或数十个 IGBT 芯片和反并联二极管芯片被集成到一块共同的底板上。芯片与底板之间通过金属化的陶瓷基片进行绝缘，芯片与芯片之间的电气连接通过铝绑定线键合的方式来实现。然后，整个结构通过绝缘外壳封装密封，仅留出外部电气连接用功率主端子和控制用辅助端子。

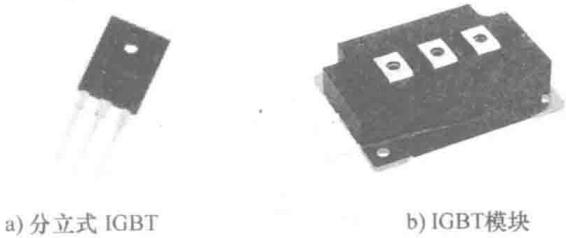


图 1-2 分立式 IGBT 与 IGBT 模块

分立式 IGBT 通常电压较低、电流较小，而 IGBT 模块的电流通常为数十到数千安培，电压可达数千伏。两者的应用场合不同，前者适用于容量较小的电力电子装置，而后者适用于高电压、大电流的电力电子装置。

本书仅针对 IGBT 模块展开叙述，并不涉及分立式 IGBT 元件。

2. 高压 IGBT 模块

目前，IGBT 模块的额定电压等级主要分为 600V、1200V、1700V、2500V、3300V、4500V 和 6500V 7 种。高压 IGBT 模块通常是指 1700V 及以上电压等级的 IGBT 模块，而 1700V 以下的 IGBT 模块称为中低压 IGBT 模块。但是仅仅从电压等级来定义高压 IGBT 模块是不准确的。高压 IGBT 模块不仅是指电压等级高，在模块的芯片技术、制造工艺和测试方面都与中低压 IGBT 模块有很大区别。表 1-1 给出了三菱电机公司高压 IGBT 模块与普通中低压 IGBT 模块的对比，可见高压 IGBT 模块具有更严格的制造和测试标准。

表 1-1 高压 IGBT 模块与普通中低压 IGBT 模块对比

对比项目	普通中低压 IGBT 模块	高压 IGBT 模块
晶圆测试	抽样检查	100% 检查
芯片测试	只测静态特性	测静态特性 + 动态特性

(续)

对比项目	普通中低压 IGBT 模块	高压 IGBT 模块
焊接	厚度控制	
凝胶灌注	不抽真空	抽真空
电气测试	只测 $T_j = 25^{\circ}\text{C}$	测 $T_j = 25^{\circ}\text{C}$ 和 125°C
绝缘测试	只测 $T_j = 25^{\circ}\text{C}$	测 $T_j = 25^{\circ}\text{C}$ 和 125°C
出厂测试报告	根据客户要求,提供出厂测试报告	提供全部出货的出厂测试报告

因为高压 IGBT 模块最大的应用场合是轨道牵引,所以也称为牵引级 IGBT 模块;而中低压 IGBT 模块的最大应用场合是工业变频,所以也称为工业级 IGBT 模块。

由此可见,高压 IGBT 模块并没有严格的定义。本书中的高压 IGBT 模块是指额定电压在 1700V 及以上、绝缘耐压在 6kV 以上且具有特定封装形式的 IGBT 模块。关于高压 IGBT 模块的封装形式将在第 3 章中详细叙述。

3. 国内外 IGBT 器件制造商信息

表 1-2 给出了世界上主要 IGBT 器件制造商的相关产品信息。

表 1-2 世界主要 IGBT 器件生产厂家及其系列化产品

生产厂家 \ 系列化产品	600V	1200V	1700V	2500V	3300V	4500V	6500V
Infineon(德国)	×	×	×		×	×	×
CSR(Dynex)(中国) ^①		×	×		×	×	×
Hitachi(日本)			×	×	×	×	
ABB(瑞士)			×	×	×	×	×
Mitsubishi(日本)	×	×	×	×	×	×	×
Fuji Electric(日本)	×	×	×		×		
IXYS(美国)	×	×	×				
Semikron(德国)	×	×	×				
Toshiba(日本)			×		×	×	
Microsemi(美国)	×	×	×				
Vincotech ^②	×	×					
IR(美国) ^③	×	×					
Powersem(德国)	×	×					
Fairchild(美国)	×						
Sensitron(美国)	×						

注: ×表示具有该产品。

① 2008 年 11 月,中国南车 CSR 正式收购英国 Dynex 公司。2014 年 12 月,中国南车与中国北车合并为中国中车。
② 2010 年 11 月,三菱电机收购 Vincotech 公司。
③ 2015 年 1 月,英飞凌公司收购美国 IR 公司。

由表 1-2 可见,系列化生产高压 IGBT 模块的厂家只有英飞凌、中国南车、日立、三菱电机、ABB 和东芝几家公司,主要集中在日本和欧洲这两个制造业强国。高压 IGBT 模块是科技含量非常高的产品,是功率半导体技术的制高点。随着中低压 IGBT 模块市场竞争的日趋激烈和盈利的减少,不少专注于低压 IGBT 模块制造的厂商将逐步向高压 IGBT 模块领域进军,如富士电机开始制造 3300V 高压 IGBT 模块,IXYS 也有意系列化生产 1700V 以上高压 IGBT 模块。另一方面,具有高压 IGBT 模块制造能力、产品线全面的厂家也对一些中低压 IGBT 制造商进行了收购和整合。可以预见,功率半导体器件及其制造工艺的技术创新,仍将成为世界各国电力电子技术领域竞争最激烈的阵地之一。各制造业强国会继续在这一领域注入大量人力、物力和财力,力争赶超该领域技术发展的最前沿。

除中国南车外,国内的 IGBT 模块制造商主要致力于中低压 IGBT 模块的封装制造,芯片等核心技术还受制于人。攻克核心技术难题、开发具有自主知识产权的 IGBT 模块并产业化,对建设科技强国和提升我国综合国力具有重大的经济和技术意义。

1.4 IGBT 模块的关键技术

IGBT 模块作为功率半导体器件,既有强电技术的特性,也有微电子技术的许多特征,技术含量较高。图 1-3 描述了 IGBT 模块的八大关键技术:芯片技术、封装技术、材料技术、制造技术、测试技术、可靠性技术、质量管理技术和应用技术。

1. 芯片技术

芯片技术是 IGBT 模块的最关键技术之一,是产品更新换代的标志。目前,世界上也只有少数国家拥有并掌握 IGBT 模块的芯片技术。本书第 2 章从表面栅和垂直结构两个方面介绍了高压 IGBT 模块的芯片技术。目前,沟槽栅和场截止技术已经被广泛应用于中低压 IGBT 模块,降低了损耗,提高了性能。

英飞凌公司和日立公司已经将该技术应用到 3300V 高压 IGBT 模块中,其他公司也将下一代高压 IGBT 模块的芯片锁定在优化沟槽栅和场截止技术上。对芯片低损耗、低成本、高可靠性的技术要求使得各 IGBT 模块制造商对器件原理不断创新,对制造工艺不断优化。

2. 封装与制造技术

封装技术是提高 IGBT 模块性能的又一关键技术,而制造技术则是保证产品质量的关键所在。本书第 4 章介绍了高压 IGBT 模块的封装和制造的相关流程。目前世界上主要的高压 IGBT 模块制造厂家对高压 IGBT 模块的封装具有统一的尺寸规

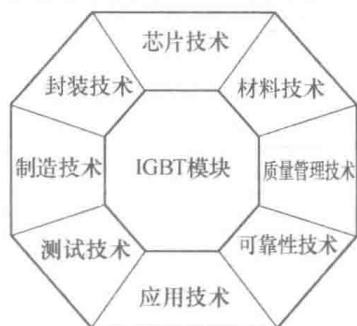


图 1-3 IGBT 模块的关键技术