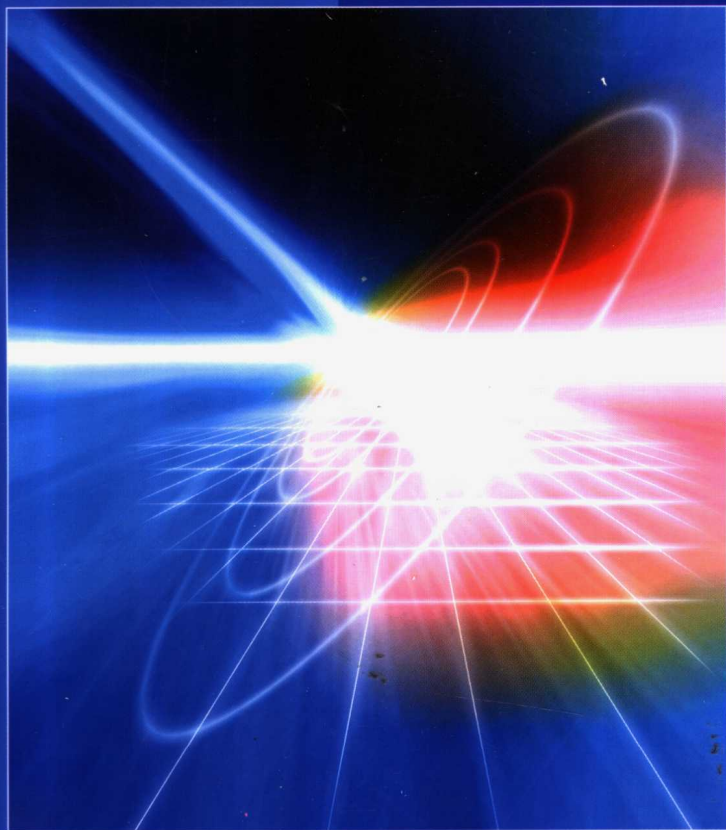


现代电力电子应用技术丛书

IGBT 和 IPM 及其应用电路

周志敏 周纪海 纪爱华 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

现代电力电子应用技术丛书

IGBT 和 IPM 及其应用电路

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

IGBT 和 IPM 及其应用电路/周志敏, 周纪海, 纪爱华编著.

—北京: 人民邮电出版社, 2006. 3

(现代电力电子应用技术丛书)

ISBN 7-115-14354-4

I. I... II. ①周... ②周... ③纪... III. ①绝缘栅场效应晶体管—电路②功率晶体管—电路

IV. TN386.2②TN323

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 007924 号

内 容 提 要

本书在介绍 IGBT 和 IPM 结构与特性的基础上, 结合国内外电力电子器件的应用和发展趋势, 全面系统、深入浅出地阐述了 IGBT 和 IPM 的典型电路和应用技术, 突出实用性。全书共 7 章, 分别介绍了电力电子器件的发展和研发动向、IGBT 的结构和工作特性、IGBT 功率模块、IGBT 驱动电路设计、IGBT 保护电路设计、IGBT 应用电路设计以及 IGBT 在现代电源领域中的应用。

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, 可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事电源开发、设计和应用的工程技术人员和高等院校相关专业师生阅读参考。

现代电力电子应用技术丛书 IGBT 和 IPM 及其应用电路

◆ 编 著 周志敏 周纪海 纪爱华

责任编辑 刘 朋

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京艺辉印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 21.25

字数: 531 千字

印数: 1—5 000 册

2006 年 3 月第 1 版

2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-14354-4/TN · 2677

定价: 32.00 元

读者服务热线: (010) 67129264 印装质量热线: (010) 67129223

丛书前言

电力电子学(或电力电子技术)的理论是建立在电子学、电力学和控制学三个学科基础之上的。起初它被认为是介于电子学、电力学与控制学之间的边缘学科,但是随着电力电子技术的不断发展,它已成为一个涉及领域广阔的学科,可以说凡是涉及到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。

电力电子技术之所以和“电力”二字相关联,是因为最初它的应用范围主要是在电气工程 and 电力系统中,对市电或强电进行控制与变换。其作用就是根据负荷或负载的特殊要求,对市电、强电进行各种形式的变换(主要是频率的变换),以使电气设备得到最佳的电能供给,使电力系统处于最佳的运行状态,从而使电气设备和电力系统高效、安全、经济地运行。电力电子技术发展到今天,它不仅仅只涉及到“电力”的变换与应用,而且也涉及到化学能电源(电池)、太阳能电池电能的变换与应用。虽然已突破了当初单纯“电力”的界限,但仍然是在功率变换的范围内。仅就电力电子技术本身而言,它主要包括两个方面,即电力半导体器件制造技术和电力半导体变流技术。前者是电力电子技术的基础,后者是电力电子技术的核心。二者相互依存、相互促进,使得电力电子技术发展的势头一浪高过一浪,使其在科技进步和经济建设中发挥着越来越重要的作用。

目前电力电子技术已经成为新世纪应用最广泛和最受关注的技术之一。发达国家对电力电子器件的研制和电力电子技术的创新十分重视,并且投入了大量的人力、物力和财力,形成了具有一定规模的产业,而我国与发达国家相比在技术和产业规模上都还有较大差距。为此,我们特组织有关专家、学者和技术人员编写了《现代电力电子应用技术丛书》,目的在于介绍目前国内外电力电子领域内的新器件、新产品、新工艺、新技术和新方法,推广和普及电力电子技术的应用。本丛书在编写时力求实用性和先进性并举,希望本套丛书的出版能够解决电力电子技术应用中的一些实际问题,促进电力电子技术的发展和广泛应用。

本套丛书主要包括《IGBT 和 IPM 及其应用电路》、《开关电源功率因数校正电路设计与应用》、《现代开关电源控制电路设计及应用》和《充电器电路设计与应用》等,将陆续出版,恳请广大读者批评指正。

本套丛书题材新颖实用,内容丰富,文字通俗,具有较高的实用价值,可供电力、工控、电信、信息、航天、军事及家电等领域的工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生阅读参考。

前 言

电力电子半导体器件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,其中模块化应用领域的研发更为广泛和深入。从模块原理引入电力电子技术领域以来,已开发和生产出多种内部电路相连接形式的电力半导体模块,诸如双向晶闸管、MOSFET 以及 IGBT 等模块,使得模块技术得以更快的发展。

20 世纪 80 年代,IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor,绝缘栅双极型晶闸管)器件研发成功。IGBT 器件为电压驱动型,是 MOS 结构双极半导体器件,具有驱动功率小、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、过压保护电路、过流保护电路、过热保护电路、欠压保护电路、钳位电路以及自诊断电路等封装在同一绝缘外壳内的智能化 IGBT 模块(Intelligent Power Module, IPM)。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。

本书结合国内外 IGBT 和 IPM 的发展与研发动向以及新器件在各行业中的设计和应用,系统地介绍了 IGBT 和 IPM 的结构原理及典型器件、典型模块的技术特性,重点介绍 IGBT 和 IPM 应用技术及应用电路,本书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,使得从事电力电子变换器开发、设计、应用和维护的人员从中获益。读者可以以此为“桥梁”,系统全面地了解和掌握 IGBT 和 IPM 模块的应用技术。

在本书写作过程中,在资料收集和技术信息交流等方面都得到了国内的专业学者和同行的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 功率半导体技术的发展	1
1.1.1 电力电子器件的发展	1
1.1.2 IGBT 的发展历程和基本特点	4
1.1.3 新技术动向	8
1.2 IGBT 模块化	9
1.2.1 IGBT 功率模块	9
1.2.2 新一代的 IPM	12
1.3 IGBT 研发的新进展	13
1.3.1 IGBT 的研制	14
1.3.2 IGBT 模块的最新发展	17
第 2 章 IGBT 的结构、工作特性和主要参数	20
2.1 IGBT 的结构和工作特性	20
2.1.1 IGBT 的结构与工作原理	20
2.1.2 IGBT 的基本特性	27
2.1.3 带反向阻断能力的 IGBT 的特性	33
2.1.4 IGBT 的锁定效应和安全工作区	35
2.2 IGBT 的等效电路模型及主要参数	36
2.2.1 IGBT 的等效电路模型	36
2.2.2 IGBT 的主要参数	39
第 3 章 IGBT 功率模块	41
3.1 功率半导体模块	41
3.1.1 功率半导体模块的构造和特点	41
3.1.2 功率模块的性能	44
3.1.3 IGBT 模块新技术	48
3.2 智能功率模块 IPM	54
3.2.1 智能功率模块 IPM 的结构与特点	54
3.2.2 IPM 的保护功能及死区时间	57
3.3 新型 IGBT 模块	60
3.3.1 IR 系列 IGBT 模块	60
3.3.2 高压 IGBT 模块	62
3.3.3 富士电机的 R 系列 IPM	64
第 4 章 IGBT 驱动电路设计	67
4.1 IGBT 驱动技术	67

4.1.1	IGBT 栅极驱动要求	67
4.1.2	IGBT 的驱动电路	70
4.2	M 系列 IGBT 驱动模块	74
4.2.1	M57957L/M57958L 厚膜驱动集成电路	74
4.2.2	IGBT 专用驱动器 M57962L	76
4.2.3	IGBT 驱动模块 M57962AL 的应用	79
4.3	IR 系列集成驱动模块	81
4.3.1	IR2110 集成驱动器	81
4.3.2	IR2130 驱动器及其在逆变器中的应用	88
4.3.3	IR22 系列新型栅极驱动及传感集成电路	91
4.4	SCALE 集成 IGBT 驱动板	92
4.4.1	SCALE 集成电路	92
4.4.2	2SD315A 驱动集成电路	97
4.4.3	应用电路	99
4.5	EXB 系列集成驱动器	102
4.5.1	EXB 系列集成驱动器的特点和工作原理	102
4.5.2	EXB 系列驱动器应用电路	108
4.6	IGD508E/IGD515E 智能栅极驱动模块	114
4.7	TX 系列驱动器	118
4.7.1	TX-KA 系列驱动器	118
4.7.2	TX-KB102 系列驱动器	136
4.7.3	TX-KC102 系列驱动器	139
4.7.4	TX-KD 系列驱动器	142

第 5 章 IGBT 保护电路设计 148

5.1	IGBT 保护电路	148
5.1.1	IGBT 过压保护电路	148
5.1.2	IGBT 过流保护	152
5.1.3	IGBT 过热保护	158
5.2	IGBT 典型保护电路	159
5.2.1	IGBT 短路保护电路	159
5.2.2	快速短路和过电流保护电路	162
5.2.3	HL601A 厚膜集成电路	165
5.3	无损缓冲吸收电路的设计	167
5.3.1	IGBT 无损吸收网络	167
5.3.2	缓冲电路的模型	170
5.3.3	谐振电容和谐振电感的选择	171
5.3.4	美国 CDE 电容模块	173
5.3.5	高频串联逆变器谐振极电容缓冲电路	174
5.3.6	C-2D 和 C-L-2D 型无源无损缓冲电路	178

5.3.7	新型无源无损缓冲电路拓扑	181
5.3.8	复位型无损电压钳位变换器	184
5.3.9	无源软开关变换器	186
5.3.10	无损缓冲双管串联单正激电路	188
5.4	典型保护电路的设计	191
5.4.1	大功率逆变器组合式 IGBT 过流保护方案	191
5.4.2	具有快速短路保护的中频电源	195
第 6 章	IGBT 应用电路设计	198
6.1	功率器件的选择	198
6.1.1	IGBT 模块的选择	198
6.1.2	IGBT 模块的散热设计	202
6.2	IGBT 模块应用电路的设计	208
6.2.1	IPM 在变频电源中的应用	208
6.2.2	IGBT 模块在通用变频电源中的电路设计	214
6.2.3	高压变频电源	218
6.2.4	软开关变频电源设计	221
6.3	IGBT 模块的电磁兼容性	224
6.4	IGBT 损坏的原因及可靠性失效分析	228
6.4.1	IGBT 损坏的原因及对策	228
6.4.2	半导体器件失效分析	231
第 7 章	IGBT 在现代电源领域的应用	233
7.1	低功率 IGBT 的应用	233
7.2	IGBT 在不间断电源中的应用	237
7.2.1	IGBT 在 UPS 中的应用情况	237
7.2.2	IGBT 构成的 Delta 型变换器	239
7.2.3	UPS 设计的趋势	243
7.3	IGBT 在逆变电路中的应用	245
7.3.1	IGBT 在全桥逆变电路中的应用	245
7.3.2	IPM 模块在大功率逆变电源中的应用	246
7.3.3	IGBT 在正弦波中频逆变电源中的应用	248
7.3.4	IGBT 在全桥电流源高频链逆变电源中的应用	252
7.4	IGBT 在逆变焊接电源中的应用	256
7.4.1	IGBT 在逆变式弧焊电源中的应用	256
7.4.2	IGBT 在 300A 逆变焊接电源中的应用	258
7.4.3	IGBT 在半桥逆变型电子束焊接电源中的应用	259
7.4.4	IGBT 软开关逆变式弧焊电源	262
7.4.5	IGBT 在 CO ₂ 气体保护焊电源中的应用	265
7.5	IGBT 在变频电源中的应用	267

7.5.1	中压变频电源的主电路	267
7.5.2	功率器件串联型中压变频电源	270
7.5.3	电容钳位型多电平中压变频电源	274
7.5.4	多个独立直流电压源的级联型拓扑结构	276
7.5.5	IGBT 在大功率谐振过渡软开关变频电源中的应用	278
7.5.6	采用智能功率模块的中频高压电源	284
7.5.7	采用 SA08 实现的 400Hz 电源	287
7.6	IGBT 在 DC/DC 变换器中的应用	290
7.6.1	软开关 DC/DC 变换器	290
7.6.2	零转换 PWM DC/DC 变换器	300
7.6.3	推挽工作模式 DC/DC 变换器	305
7.6.4	全桥移相 ZVS-PWM DC/DC 变换器	310
7.6.5	ZVZCS PWM 全桥变换器	315
7.6.6	三电平软开关技术	318
参考文献		329

第 1 章 概 述

1.1 功率半导体技术的发展

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 至 80 年代)主要应用于工业和电力系统。近一二十年来,由于 4C 产业(Communication,通信;Computer,计算机;Consumer,家用电器;Car,汽车电子)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种领域。

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 型器件,它为 4C 产业的发展奠定了扎实的基础。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。这可以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,都属于亚微米技术甚至向深亚微米技术方向发展。

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 BGA(球栅阵列)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了传统大功率器件的双面散热方式。

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,或者是同一封装中。功率半导体的封装技术已形成了向在一个封装中具有多芯片模块(MCM)方向发展的趋势。这些最新进展促使各种电力电子装置的电气性能更好,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,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在高、精、尖方向不断提出新的要求,才促进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。人们仍在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,减少了能量消耗。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,其在近几年的发展十分强劲,促使出现了一个新的术语去描述它,即所谓功率管理。它的内涵已不同于功率变换,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技术(PFC),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 40 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)、巨型晶体管(GTR)、功率 MOSFET 和绝缘栅双极晶体管(IGBT)为代表的功率集成器件(PID),以智能化功率集成电路(SSPIC)、高压功率集成电路(HVIC)为代表的功率集成电路(SPIC)等三个发展时期,具体可分为以下四个阶段。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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,可直接用集成电路进行驱动,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。也就是说,电力电子器件与电子器件在发展的道路上,经历了一段时间的各自研发之后,又走到互相渗透、互相推进的创新阶段。

(4) 第四阶段

以 SSPIC、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了一起,出现了将全控型电力电子器件与驱动电路、控制电路、传感电路、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、强电与弱电、功率流与信息流的集成,成为机电一体化的基础单元。预计 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发展中。

图 1-1 给出了各种主要功率半导体器件,这里暂且把功率半导体器件分为三类,即传统的双极型器件、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

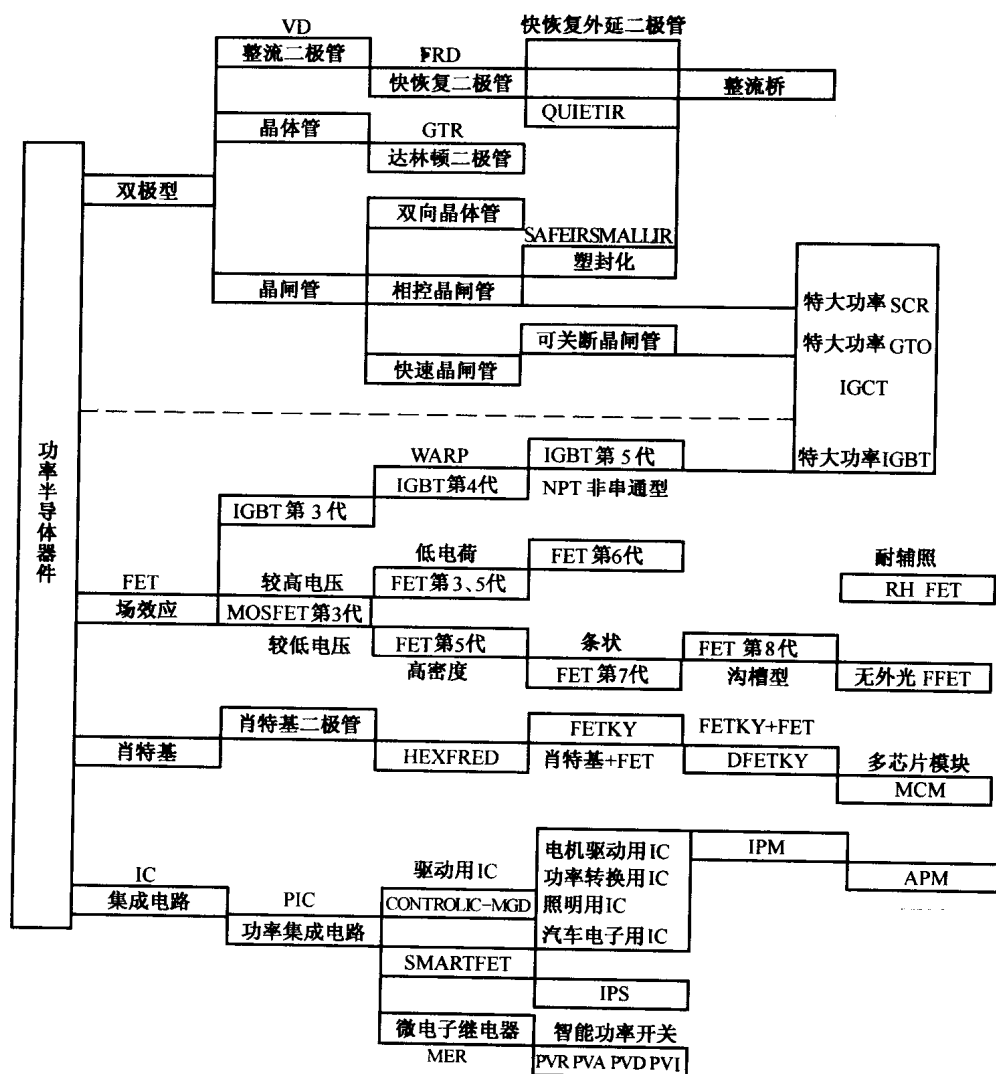


图 1-1 功率半导体器件概貌

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、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、OGBT、IEGT 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、高斩波频率的应用领域 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 4 种电力电子器件构成主流器件。

在器件结构上，从分立器件发展到由分立器件组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复杂模块。功率集成器件从单一器件发展到模块的速度更为迅速，目前已经开发出具有智能化功能的模块（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与模块的发展概况

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，或由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，或由几个分立器件芯片组成的简单模块，或由几个分立器件芯片与辅助电路组成的模块
巨型晶体管 (GTR)		全控、电流型控制		
第二代功率集成器件 (PID)	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，或由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 (SPIC)	智能功率集成电路 (SSPIC)、高压功率集成电路 (HVIC)			集成器件，或由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、更小的体积和重量、效率更高的芯片、更加低廉的价格、更加优秀的品质、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新的、经济安全的解决方案, 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 的发展历程和基本特点

1. IGBT 的发展历程

20 世纪 80 年代初期由于功率垂直双扩散金属氧化物半导体 (VDMOS) 的发展遇到了提高电压与降低导通电阻、降低损耗的尖锐矛盾, 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, 绝缘栅双极型半导体器件)。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, 其结构是导通电阻比普通的功率 MOSFET 降低到原来的 $1/10 \sim 1/20$ 。由于这种结构而产生的寄生 PNP 晶闸管, 在特定条件下 (如过流) 导通时, 会产生锁定现象, 失去了自关断能力, 因而该结构随之被 20 世纪 80 年代中期 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。

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, 为降低饱和电压而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以及新的寿命控制法。上述技术的应用使 IGBT 从第一代进入第二代, 其饱和电压、下降时间都比第一代降低了 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, 导通电阻降低到了原来的 $1/3$ 。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, 在没有寿命控制的情况下关断时间由 12ms 缩短到 0.19ms。第二代 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; 第三代引入了微细化工艺来改善 IGBT 的综合特性; 第四代采用了沟

槽技术以降低饱和电压；第五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 1.5V、0.1ms。到目前为止，第三代 IGBT 产品已投放市场。第三代产品的功耗比第二代降低了 20%。开发的第四、五代产品的主要特征为低的通态电压、短的关断时间、低损耗、高频率、无闭锁。正在研制的第四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，其功耗将比第三代器件再降低 20%。

20 世纪 80 年代诞生了 IGBT，90 年代初进入实用化阶段。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，进而发展到将 IGBT 芯片、快速二极管芯片、控制和驱动电路、过压保护电路、过流保护电路、过热保护电路、欠压保护电路、钳位电路以及自诊断电路等封装在同一绝缘外壳内，具有智能化的 IGBT 模块（IPM）。它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。为了实现这些高性能，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。要提高功率 IGBT 的耐压能力，势必增加高导通电阻，从而妨碍器件在高电压、大电流范围内的应用。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 IGBT 的特性不比 N 沟道 IGBT 差多少，这非常有利于在应用中采取互补结构，从而扩大其在交流和数字控制技术领域中的应用。IGBT 器件已成为当前工业领域中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的 IGBT 产品已系列化，600V/8A~1200V/600A 的器件已产品化，耐压为 1800V 的器件也已研制成功。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 主要的生产厂家有日本的东芝公司、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（370~600V），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 WARPSPEEDTMIGBT 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，其在大功率领域中的生命力是令许多人仍难以相信的。现在，研制跨世纪的 IGBT 取得了巨大的进展，形成了一个新的器件应用平台。IGBT 最大的优点是无论在导通状态还是短路状态下都可以承受电流冲击，而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 模块在大功率领域中的应用非常广泛，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,是在功率 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,又具有双极型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 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 所能应用的范围基本上替代了传统的晶闸管 (SCR)、可关断晶闸管 (GTO) 以及晶体管 (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。初看起来 IGBT 好像是由 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 驱动达林顿晶体管。IGBT 的基本工作原理为在栅极和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。当栅极和发射极之间的电压降低时,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 的静态特性基本上与功率 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 有拖尾电流等问题存在。

IGBT 还具有功率晶体管漂移区电导调制、导通损耗低的特点,且较功率 MOSFET 有着更大的电流密度、更高的功率容量、较高的开关频率和更宽的安全工作区。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。EUPEC 生产的 600A/6500V 的 IGBT 模块已获得实际应用,8000V 的 IGBT 已由 ABB 公司研制成功。

IGBT 是新型电力电子器件的主流器件之一,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,IGBT 在高电压、大电流的晶闸管制造技术的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,所以被认为是最具代表性的电力电子器件,甚至有人称“21 世纪是 IGBT 的时代”。IGBT 是一种电压驱动型器件,因而栅极驱动电路简单,它有较高的频率(开关)、易于实现的保护特性和 di/dt 、 du/dt 特性,是目前 100kHz 以下各种功率变换器中应用最普遍和使用最多的功率器件。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。目前市场上销售的低压交流电动机变频器调速模块,不管是哪一个国家的产品,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 的功率范围内有着广阔的市场。

3. 第四代 IGBT 的基本特点

目前,IGBT 已发展到第四代,西门子、EUPEC 公司已可提供电流范围为 10A~

2.4kA, 电压范围为 600V~3.3kV 的 IGBT 模块。以 1.2kA/3.3kV 的 IGBT 为例, 其栅极和发射极间电压仅为 15V, 触发功率低, 关断损耗小, di/dt 、 du/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 的开发主要采取以下技术。

(1) 沟槽 (Trench) 结构

同各种电力半导体一样, IGBT 向大功率化方向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) 的矛盾之间的折衷。在常规的一至二代 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 分量必须占主导地位。 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), 由于平面结构中栅极处于表面, 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。第四代 IGBT 采用特殊的工艺制成沟槽结构, 挖槽结构是在芯片内部, 微细化率可以大幅度提高。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, 降低通态压降, 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% 芯片面积) 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、更高的效率。

(2) 非穿通 (NPT) 结构

非穿通型 (NPT) IGBT 采用 N 型 Si 衬底, N-区厚度是 PT 的 1.5~2 倍, 而集电区厚度是 PT 的 1/60, 因此下降时间短, 开关损耗小, 同一芯片尺寸和同一电流额定值的 NPT 型 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 型 IGBT 模块已用于机车牵引), 芯片热阻小, P+ 发射区是“超薄”的, 只有几个微米, 而 PT 型 IGBT 的发射区厚度大于 300 μ m。1200V NPT 型 IGBT 比 PT 型 IGBT 的热阻下降 40%。采用非穿通结构取代穿通结构, 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 年在第四代 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 600V, 额定电流为 0~100A, 硬开关工作频率可达 150kHz, 谐振逆变软开关频率可达 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。现在 IGBT 的性能正在逼近极限, 要进一步大幅度降低损耗, 现行的这种结构不会再有太多的潜力了, 为此 IGBT 的开发已进入第五代了。

由于 IGBT 兼有功率 MOSFET 高输入阻抗、高速特性和巨型晶体管 (GTR) 大电流密度特性, 其具有安全工作区宽、易于并联等独特的优点, IGBT 被认为是理想的新型电力电子器件。IGBT 的应用使功率电子系统的体积、重量和效率不断改进, 以 IGBT 为核心的智

能功率技术为现代社会提供了一种有效的功率和能量控制手段。IGBT 的应用领域涉及电机调速、逆变器、中频电源、开关电源、汽车电子、激光电源以及各种控制电路和交流伺服系统,并大有取代功率 MOSFET 和 GTR 的趋势。因此,从节能和节约原料等方面来看,IGBT 是实现节能设备具有高效率、低功耗和高性能的重要技术,如功率电子装置一般节电 10%~40%。以 IGBT 为首的电力电子器件的采用使电气设备的频率大大提高,体积可缩小到原来的 1/10~1/20,节约材料 40%~80%。因此,电力电子器件的发展对国民经济的增长和工农业各领域的发展具有重要的战略意义。电力电子技术在军事装备方面也占有一席之地,可应用于空间站、雷达、军用飞机、宇宙飞船、潜水艇、军舰等的电源系统。IGBT 器件的发展对提高武器装备的性能和可靠性、减轻重量、减小尺寸也有着重要的作用。

1.1.3 新技术动向

1. 微细加工技术

对于多子器件功率 MOSFET 的研究表明,其耐压与导通电阻已接近理论极限。采用微细加工技术制作的平面型 IGBT,其单元尺寸大大减少;采用微细加工技术制作的 RESURF,与平面型 MOS 相比,其导通电阻降低的效果明显;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)。采用微细加工技术制作的挖槽结构还有效地改善了 IGBT 的性能,低的沟道电阻有利于防止 NPN 型寄生双极晶体管的误动作,实现 IGBT 高速、高耐压的协调。微细加工技术的引入使电力电子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的典型实例之一是 NPT-IGBT 和续流二极管(FWD)的低压降化。新设计的 NPT 同 PT 相比具有耐压能力强、器件并联运行容易、并联损耗随温度变化小等一系列特点,另外可利用数值解析、仿真技术进行工艺优化、结构优化设计,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、电磁场的产生、破坏解析等。

3. 高耐压 SOI 技术

SOI (Silicon on Insulator) 指的是 Si 基片中间存在着氧化膜结构,氧化膜上的硅叫“活性层”,下层的硅称为“台基极”,使用的硅活性层厚度是 $7\mu\text{m}$,中间氧化膜厚度为 $2\mu\text{m}$,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:其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;其二是将过热、过流、过压保护电路以及自诊断电路、驱动电路与多个主电路芯片以厚膜电路方式集成于一体的智能功率模块 IPM (Intelligent Power Module)。IPM 具有以下特点:

- ① 低损耗,采用第四代挖槽型 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。