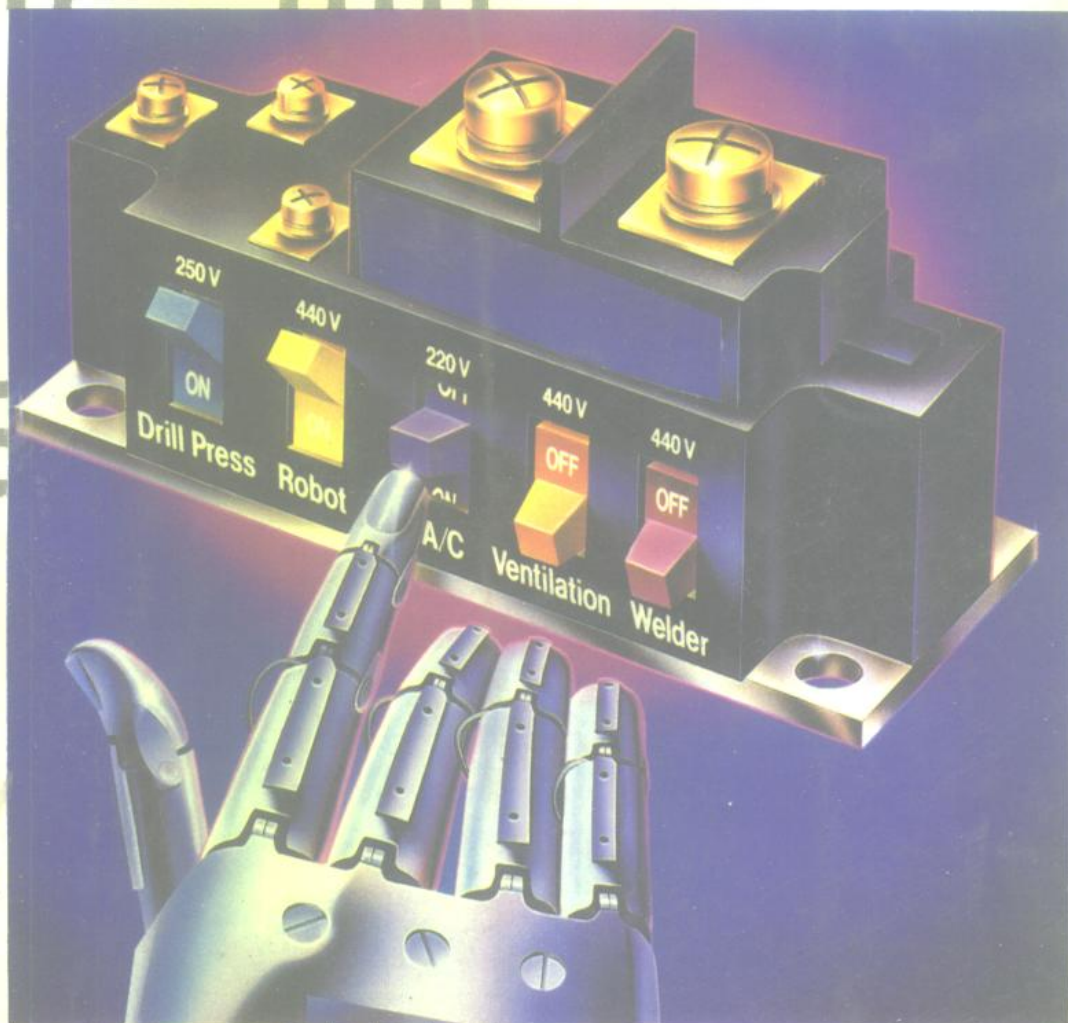


现代功率电子技术

XIANDAI GONGLU DIANZI JISHU

苏开才 毛宗源 编著



国防工业出版社

现代功率电子技术

苏开才 毛宗源 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

现代功率电子技术/苏开才,毛宗源编著. —北京:国防工业出版社,1995.9

ISBN 7-118-01306-4

I. 现… II. ①苏… ②毛… III. 半导体功能器件 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 05013 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 427 千字

1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:20.10 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

**国防科技图书出版基金
第一届评审委员会组成人员**

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德

(按姓氏笔画排列)何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

前 言

现代功率电子技术是利用现代功率半导体器件对电能进行变换、控制、开关的技术。它是一门融微电子技术、控制理论、现代功率半导体器件及其应用于一体的新兴的边缘学科。

现代功率电子技术始于 70 年代,从改造传动产业起家,以节能和节约原材料为动力,在开关技术基础上,经过约 20 年的飞速发展,现已以大容量、高电压、高频率、高效率、高性能、轻重量、小尺寸的面貌出现在各个工业领域和生活、办公设备之中。它广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、通信、交通运输、机械、轻工、国防、办公设备和家用电器等领域,发挥了巨大的作用。

但是,由于这一学科具有跨学科的特点,功率电子学及其应用总的来说是相当复杂的,并且为多数非专业人员难以理解。近年来,这一领域的文献迅速增多,而希望系统地了解这一学科的有进取心的读者往往不能如愿以偿。虽然可以找到不少论文和论及现代功率电子技术的特定领域的论著,但是,集中地论述这一学科的各个方面(特别是现代功率半导体器件及具体应用技术)的书籍几乎没有。

为满足这种需要,作者得到国防科技图书出版基金的资助和国防工业出版社的大力支持,才有可能将在教学中使用多年的教材和科研成果编著成书予以出版。本书从介绍现代功率电子学现状与发展开始,详细论述了 GTR、GTO、MOSFET、IGBT、MCT 等新型功率半导体器件的结构、性能、参数、特性及具体电路,然后重点论述了功率半导体器件在电动机调速、电源等方面的应用技术。全书分为十章:第一章为功率电子学现状与发展;第二章为功率晶体管;第三章为功率场效应管;第四章为绝缘栅晶体管;第五章为可关断晶闸管;第六章为其他新型功率半导体器件;第七章为功率半导体器件的散热设计;第八章为功率半导体器件在电动机调速中应用;第九章为交直流可变电源;第十章为高次谐波分析与消除。

本书第二、三、四、五、六、七、十章由苏开才执笔;第一、八、九章由毛宗源执笔;最后由苏开才定稿。

本书在编著过程中,华南理工大学科技开发总公司毕英满高级工程师提供了丰富的国外器件的资料;玉瑞、朱文平等工业自动化专业硕士研究生提供了具体试验研究数据;工业电气自动化教研室的领导和全体教师给予大力支持;中南电力电子学会理事长、广东工学院符曦教授给予帮助,在此一并表示感谢!

本书适用于高等院校高年级学生、研究生、教师及科研人员、工业工程师阅读。

编著者

于华南理工大学工业自动化系

目 录

第一章 功率电子学现状与发展	1
§ 1 功率电子技术的形成及发展动力	2
§ 2 80 年代功率电子技术的基本动向	3
1. GTO 向大容量化和快速化发展,取得了重大突破	3
2. GTR 模块化,并进入成熟时期	4
3. MOSFET 飞速增长	4
4. MOS 双极复合器件大发展	4
5. 功率 IC 已进入功率半导体市场	5
6. 智能化模块将产生新一代功率电子装置	5
§ 3 扩展到一切领域,向轻小高精发展的功率电子装置	6
1. 自换向电路已经成熟,开始了全面取代外部换向电路	6
2. PWM 技术已趋成熟,进入各功率级	6
3. 交流调速已覆盖了工业所有领域和功率级	7
4. 电力系统用功率变换装置继续向大容量发展	8
5. 高频多谐振开关电源是一种新的功率电子技术的发展方向	8
§ 4 展望	9
第二章 功率晶体管	10
§ 1 功率晶体管的特点和参数	10
1. 功率晶体管的特点	10
2. GTR 的结构	11
3. GTR 的参数	11
4. GTR 的特性	12
§ 2 GTR 的开关特性	12
1. 开关响应特性	13
2. t_d 、 t_r 、 t_s 和 t_f 存在原因及改善措施	14
3. GTR 在开关过程中工作点移动轨迹	15
§ 3 GTR 的功率特性	17
1. 正向偏置安全工作区	17
2. 反向偏置安全工作区	18
3. GTR 的二次击穿	18
§ 4 GTR 模块	21
1. 达林顿晶体管	21
2. GTR 模块	21
3. GTR 模块与电动机配套	24
4. GTR 智能功率模块	25
§ 5 GTR 的驱动电路	27
1. GTR 驱动电路的设计方法	27
2. 驱动电路实例	29

§ 6 GTR 的保护电路	35
1. GTR 的过电流保护	35
2. 电流电压传感器 LEM 模块保护法	36
3. GTR 的开关辅助网络	38
第三章 功率场效应晶体管	44
§ 1 结型场效应晶体管	44
1. 场效应晶体管的类型	44
2. 结型场效应晶体管	44
3. JFET 的特性	46
§ 2 功率 MOS 场效应晶体管	47
1. N 沟道增强型 MOSFET	48
2. N 沟道耗尽型 MOSFET	50
3. MOSFET 的参数	51
4. 使用场效应晶体管应注意的问题	52
§ 3 MOSFET 的功率特性和开关特性	52
1. MOSFET 的最大输出功率和最大功耗	52
2. 安全工作区	53
3. 开关特性	53
§ 4 VMOS 场效应晶体管	55
1. VVMOS 结构	55
2. VDMOS 结构	56
3. VMOSFET 的工作原理	56
4. VMOSFET 的优点	57
§ 5 功率 MOSFET 模块和驱动电路	59
1. 功率 MOSFET 模块	59
2. MOSFET 的驱动电路	62
第四章 绝缘栅晶体管	66
§ 1 MOS-双极型功率复合器件的发展	66
1. MOS-双极型晶体管复合器件	66
2. MOS 触发光控晶闸管	67
3. MOS-晶闸管复合器件	67
§ 2 绝缘栅晶体管的工作原理及特性	68
1. IGBT 的基本结构	68
2. IGBT 的工作原理	68
3. IGBT 的特性	69
4. 擎住效应与安全工作区	70
5. 温度效应	72
§ 3 IGBT 功率模块	72
1. 由基本单元电路组成的模块	72
2. IGBT 智能功率模块	75
§ 4 IGBT 的驱动电路	77
1. 门极驱动条件	77
2. 直接驱动	78
3. 电流源驱动	79
4. 双电源驱动	79

5. 隔离驱动	79
6. 集成模块式驱动	81
第五章 可关断晶闸管	85
§ 1 可关断晶闸管的结构和工作原理	85
1. 概述	85
2. GTO 的结构	86
3. GTO 的导通原理	87
4. GTO 的关断	88
5. GTO 模块	89
§ 2 GTO 的关断特性	91
1. GTO 关断时门极特性	91
2. GTO 关断时阳极特性	93
§ 3 GTO 的参数	94
1. 最大可关断阳极电流 I_{ATO}	94
2. 电流关断增益 β_{off}	94
3. 擎住电流 I_L	94
4. 阳极平均电流 I_{cp}	94
5. 浪涌电流 I_{TSM}	95
6. 工作频率 f	95
7. 管压降 V_F	95
8. 正反向电压 V_{DRM} 和 V_{RRM}	95
9. GTO 的功率损耗	95
§ 4 GTO 门极驱动电路	97
1. 门极触发信号的四度特性	97
2. 门极触发方式	98
3. 门极关断控制	99
4. 门极驱动电路实例	100
§ 5 GTO 的保护电路	102
1. 过电流保护及限制 di/dt 的方法	103
2. 过电压保护及限制 dV/dt 的方法	104
第六章 其他新型功率电子器件	108
§ 1 静电感应晶体管	108
1. SIT 的结构和工作原理	108
2. SIT 的特性	108
§ 2 静电感应晶闸管	109
§ 3 MOS 栅控晶闸管	110
1. MCT 的基本结构和工作原理	111
2. MCT 的性能与其他器件的比较	112
3. 发展趋势	114
§ 4 功率集成电路	114
1. 高压集成电路	115
2. 智能功率集成电路	116
第七章 功率半导体器件的散热设计	119
§ 1 散热器的类型	119
1. 自冷式散热器	119

2. 风冷式散热器	123
3. 水冷式散热器	125
4. 沸腾式冷却散热器	126
§ 2 功率半导体器件的热阻	127
§ 3 功率半导体器件的功耗计算	132
1. 开和关的瞬时功耗	132
2. 通态功耗	133
3. 关态功耗	133
4. 驱动功耗	133
§ 4 散热器的选择及安装	134
1. 散热器的选择	134
2. 散热器的安装	136
§ 5 热管散热器	136
1. 热管的工作原理	136
2. 热管散热器的主要性能和参数	136
3. 热管散热器的选用	138
4. 热管散热器的应用	139
第八章 功率半导体器件在电动机控制技术中应用	140
§ 1 PWM 波产生的原理	140
1. 正弦波 PWM	140
2. 频率关系	142
3. 双缘调制的 PWM	143
4. 谐波消去法	147
5. 最小波纹电流法	150
6. 自适应电流控制 PWM	151
7. 相移 PWM	152
§ 2 PWM 逆变器的实现电路	153
1. 功率 MOSFET 在高频 SPWM 逆变器中的应用	154
2. 电压型 GTO 变频器	158
§ 3 微机控制的全数字 GTR-SPWM 变频调速系统	164
1. 主电路	164
2. SPWM 信号的产生	166
3. 驱动电路的设计	171
4. 保护电路	172
5. 抗干扰措施	172
§ 4 滑动模矢量控制交流电动机	175
1. 滑动模控制算法	175
2. 控制系统构成	177
§ 5 解耦变结构控制交流电动机	180
1. 解耦变结构调速系统的数学模型	180
2. 解耦变结构的控制策略	182
3. 控制算法及仿真	184
§ 6 SPWM-IGBT 逆变器	187
1. SPWM 波的产生	187
2. 驱动电路	192

3. 主电路	193
4. 保护电路	195
§ 7 磁链追踪型 PWM 通用变频器	196
1. 磁链追踪型 PWM 法的基本原理与控制算法	196
2. 控制系统的构成及软件技术	199
3. 磁链追踪型 PWM 通用变频器	199
§ 8 微机控制 GTO 斩波调速系统	202
1. GTO 斩波器	202
2. 控制脉冲的产生	202
§ 9 用 GTR 控制直流电动机调速	207
1. 直流电动机调速特性	207
2. 晶体管斩波器直流调速方式	207
3. 晶体管斩波器的主要用途	209
4. 微机控制 GTR 斩波直流调速系统	210
§ 10 功率半导体器件在同步电动机控制中的应用	213
1. 开环电压/频率控制	213
2. 自控方式	214
3. 矢量控制	215
4. 交流永磁无刷伺服系统	216
第九章 交直流可变电​​源	227
§ 1 不停电电源(UPS)的基本原理	227
1. UPS 整流器	227
2. UPS 逆变器	228
3. UPS 静态开关、系统监视操作保护及蓄电池	228
§ 2 MOSFET 组成 UPS 电路	231
1. 250 型 UPS 电路	231
2. SG1525 集成电路驱动的 MOSFET 逆变器	235
§ 3 三端式 UPS	239
1. 工作原理	241
2. 系统控制	242
3. 小结	242
§ 4 UPS 用变换电路	243
1. 高频耦合 UPS 的变换电路	243
2. PWM 双桥叠加逆变器	246
§ 5 智能型 MOS 开关电源功率集成电路	247
1. 智能型 MOS 开关电源的组成和原理	248
2. 工艺和结果	250
第十章 高次谐波分量分析及抑制方法	251
§ 1 功率电子电路非正弦周期电流傅氏级数	251
§ 2 变​​流器高次谐波的危害性	257
1. 高次谐波的危害性	257
2. 谐波发生器	257
3. 对潜在谐波问题的推断	261
4. 控制谐波措施	262
5. 高次谐波电压、电流的允许值	263

§ 3 高次谐波分析及抑制	265
1. 对称的典型阶梯波	265
2. 对称的调宽调幅阶梯波	268
3. 对称的调宽矩形波	270
§ 4 交流滤波器设计	272
1. 常 K 型两元件 Γ 型滤波器	273
2. m 型三元件 Γ 型滤波器	281
参考文献	287

第一章 功率电子学现状与发展

功率电子技术已被列为国家“八五”计划重点发展技术,为国家级科技攻关项目,预计“八五”期间我国功率电子技术将会得到更快的发展。国际上,80年代功率电子技术得到飞跃的发展,其应用已经扩展到从航天航空到家用电器的一切经济和生活领域,成为国民经济的重要的高科技产业和改造传动产业的新兴技术。

功率电子技术是利用功率半导体器件对电能进行变换、控制、开关的技术。发达国家目前电能的75%经过功率电子技术变换或控制后使用,预计2000年后将达到95%以上。由此可见功率电子技术的重要地位。

社会进步和技术发展不断地向功率电子技术提出新的要求。60年代的功率电子技术以晶闸管为主要器件,其特点为省工和长寿命。70年代进入逆变器时代,并将节能放在首位。到了80年代,功率电子进入了自关断器件时代,其技术要求是小型、快速和高精度。80年代是国际功率电子技术的发展时代,概括起来是自关断化、高频化,同时开始步入智能化。90年代将是高频功率电子技术时代,而2000年可望迎来智能功率电子技术时代。发展动向如图1-1所示。

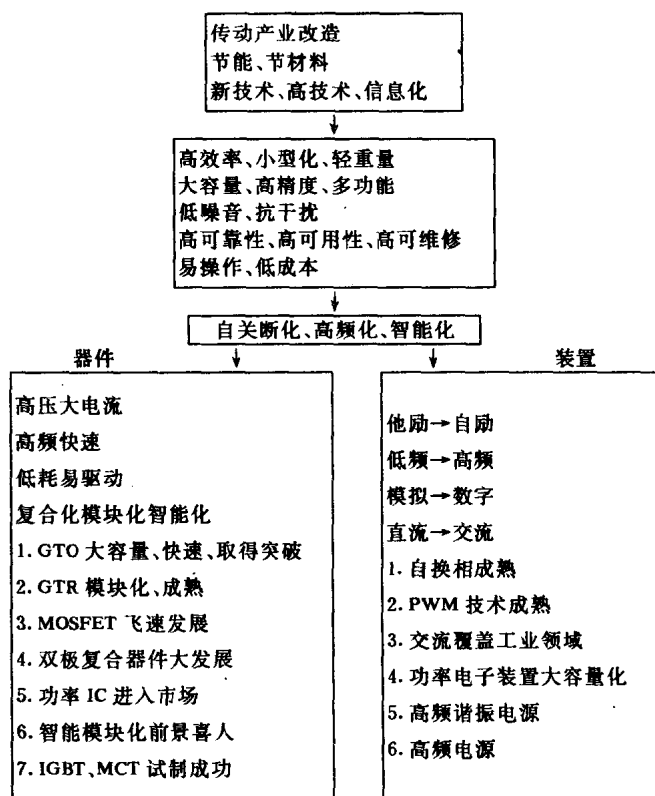


图 1-1 国外功率电子技术发展动向

§ 1 功率电子技术的形成及发展动力

半导体器件出现以前,电子器件主要是真空管和离子管。当时电子技术是一门研究真空或稀薄气体中电子运动及其应用的科学。1947 年出现第一个晶体管,它是电子技术发展史上的一个里程碑。从此以后,人们对固体中电子运动给予了极大的重视。固体器件在电子技术中占有越来越重要的地位。50 年代后期,晶体管的平面型工艺发展,为集成电路的出现准备了必要的条件。随后集成电路向大规模和超大规模迅速发展,微电子技术及信息电子技术就成为电子技术发展的主流。

晶体管诞生后的 10 年,晶闸管相继出现。晶闸管的出现使电子技术开始迈入强电领域。经过 20 多年的发展,晶闸管的容量提高了 1 万倍。以晶闸管为主的功率半导体器件增加到四五十种之多,工作频率也大大提高,这使电子技术可以在强电领域内发挥更大作用。微电子技术、控制理论和功率半导体器件的应用结合后,一门新的边缘学科——功率电子技术就在 70 年代开始形成。

功率电子技术是从改造传动产业起家的,这是由于功率电子技术满足了省功、高效、长寿命和自动化等产业改造的要求。早期的功率半导体整流器淘汰了机械整流器和水银整流器。晶闸管使轧钢工业用上了静止伦纳德装置,进而又从直传动向交流传动发展;斩波器使电力牵引进入了新时代,而最近的磁悬浮列车又是 GTO 诞生后才变成现实;交流调速的发展已经引起了传动技术的变革;功率电子技术使直流输电进入了一个新时代,又成了扬水电站等储能调功的基础技术。在热轧机中用晶闸管直流传动取代了变流机组,轧机速度从(6~8)m/s 提高到 17m/s,仅此一项年增产达 100 万吨钢。

节能和节约原材料等资源是推动功率电子技术进步的另一个动力。国际能源危机、资源缺乏,要求节能设备具有高效率、低功耗、高性能。功率电子技术被誉为节能之冠、节材能手。功率电子装置一般节电 10%~40%。风机、水泵采用交流调速年节电达 400 亿 kWh 以上。采用功率电子器件,电气设备频率提高到 400Hz、体积缩小 10~20 倍,节约材料 40%~80%。

新技术、高技术不断促进功率电子技术的发展。反过来,功率电子技术的发展,又保证了新技术、高技术的发展。功率电子技术是信息产业与传动产业之间的桥梁。信息设备发出控制指令,功率电子设备按指令控制加工设备。为了满足各种计算机要求而发展了各种 UPS 和开关电源。机电一体化的发展,促进功率电子伺服技术和功率电子传动技术的发展。为了适应航天技术体积小、重量更轻的要求,近期开发出高频多谐振电路的卡片开关电源。

综上所述,功率电子学是一门介于电力、电子和控制三者之间的边缘学科。实际上,功率电子学是介于当代最活跃的电子与自动控制这两门学科之间,所以功率电子技术才能够迅速获得发展,而成为推动工农业生产发展的重要学科。

§ 2 80 年代功率电子技术的基本动向

70 年代功率电子技术还是以晶闸管为主,而 80 年代已发展成为自关断器件的时代。晶闸管虽然仍向高电压大电流发展,但已显得落后,正在被先进的自关断器件所取代。

功率电子技术的基础是开关技术,因此开关频率的提高使功率电子技术进入了新时代。70 年代晶闸管的开关频率最高是几百 Hz,80 年代以 GTO、GTR 为代表的开关频率达到 1~10kHz, MOSFET、IGBT、SIT、MCT 等器件相继达到实用化,开关频率跃到十~几百 kHz。

高频化包括以下两个方面:

(1) 输出高频化。功率电子装置的输出为高频,主要用于快速压缩机、储能用飞轮、机床主轴、研磨机等的调速和高频感应加热及超声波发生装置等。用 SIT 等器件制出了 200kHz、2000kW 高频感应加热装置及 1.65MHz 的超声波发生装置。

(2) 装置内部高频,输出低频。由于装置采用计算机快速运算、PWM、谐振技术和改变波形等手段,要求采用高频。如电动机调速,一般要求变频装置输出频率为 150Hz 以下,为了采用 PWM 控制,改善输出波形,一般要求功率管的开关频率为几 kHz 到几十 kHz。开关频率越高,输出电流波形越接近正弦波,谐波分量越小,附加损耗越低,电机运行噪音越小,工作性能越好。

80 年代后期,功率电子技术不只停留在开关技术上,为适应小型、低成本和市场竞争的需要,功率电子技术向着智能化发展了。当前主要表现为功率电子装置采用了两种智能化器件:一种是单片智能化器件,亦即将功率半导体器件和保护、诊断、控制等电路集成在一个硅片上,这就是功率 IC 片;另一种是智能模块,将功率半导体器件、各种保护电路、控制电路、诊断电路等封装成模块。

智能化在 80 年代后期展露头角,现在正处于初期阶段,它预示着功率电子技术的发展方向,专家认为它的发展将引起功率电子技术的重大变革。

功率半导体器件进入自关断时代后,向着多样化发展。这个时期功率半导体器件的主要方向是:高电压、大电流;快速(高频);易驱动;复合化;智能化。

下面简介 80 年代功率半导体器件取得的几方面成就。

1. GTO 向大容量化和快速化发展,取得了重大突破

1962 年美国制出第一个 5A 的 GTO,经过 10 年,1973 年美国才发展到 200A、900V 的 GTO,直到 70 年代末 GTO 的最高水平为 600A、1300V。但是到了 80 年代,高电压、大电流有了重大突破,10 年内发展到 4000A、4500V 和 10000A、8000V。应用上,80 年代以前处于开发阶段,日本东芝公司从 1975 年~1984 年累计生产仅 300 台 GTO 装置。1985 年由于解决了吸收电路和串并联等技术问题,GTO 应用得到了飞跃,仅 1985 年的一年,东芝公司就生产了 1568 台。1985 年以后,东芝公司每年平均生产数千台,在许多领域获得广泛应用。

现在 GTO 器件向高频快速方向发展,研制出了高频 GTO、掩埋门极 GTO 等。高频 GTO 工作频率比一般 GTO 提高 2~3 倍,达到 3kHz。GTO 装置的最大容量达 3000kVA (AC 电机相控用)和 1200kW (PC 开关装置),最高电压达 3300V (逆变装置)和 12kV (DC

开关装置),最高频率达 2kHz(超高速电机),最多串联数达 100 个(DC 开关装置),最多并联数达 6 个(DC 开关装置)。

GTO 发展的另一个方向是模块化,开发不需要吸收电路的宽安全区器件和 MOS 门极 GTO。

2. GTR 模块化,并进入成熟时期

双极功率晶体管 GTR 在 70 年代已经发展得比较成熟,开发出 400A、1000V 器件。80 年代主要是实现了模块化。70 年代末 GTR 模块仅 50A、600V,而现在已经生产 600A、1200V,并且将续流二极管、快速二极管、控制电路、保护电路、自诊断电路等封装在一个模块内。

3. MOSFET 飞速增长

80 年代 MOSFET 在技术上解决了降低通态电阻和提高控制功率等技术问题,使其发展成熟。美、日等国分别平均以 30%和 42%的年增长速度发展。MOSFET 的最高水平为 1000V、80~150A,其模块生产水平为 50A、1000V。快速、安全工作区大和容易驱动的 MOSFET 正被广泛地应用在高频开关和电机控制中。

4. MOS 双极复合器件大发展

80 年代功率电子器件最大的成就就是 MOS 双极复合器件得到大发展,展示出喜人的前景。

(1) IGBT 取得惊人的发展

IGBT 是复合器件中发展最突出,最值得注意的新器件。1982 年美国制造出 20A 的 IGBT 初样,1985 年美国和日本都开始生产。近两年来水平飞快发展,目前研制水平达 1000A、1000V,生产水平为 50A、1000V 的器件和 400A、1400V 的模块。IGBT 具有以下特点:

1)快速、开关损耗小。10A、600V IGBT 开关时间为 0.2 μ s。12.5A、1000V 的 IGBT 开关时间为 0.19 μ s。IGBT 工作频率为 10~30kHz。在 1000V 以上电压时,它的开关损耗相当于 GTR 的 1/10,与 MOSFET 相当。

2)耐压高。现在已有 1800V、10A 的 IGBT 研究成果,预计很快将会研制出 2500V 级的 IGBT。它的耐压能力优于 GTR 和 MOSFET。

3)电流密度大、通态压降低。由于 IGBT 是电压控制型器件,电流密度大,在 2V 通态压降时为 GTR 的 3 倍或 MOSFET 的 20 倍。但是,电流密度远比晶闸管低,如与 600V 晶闸管相比,在 1V 通态压降时 IGBT 电流密度仅为晶闸管的 1/10,在 5V 通态压降时为 1/50。IGBT 通态压降比 MOSFET 低,600V、25A 的 IGBT 在下降时间为 1 μ s 时,其通态压降为 2.1V。现在已研制出 500V、100A/cm²、下降时间 0.2 μ s 时为 1.6V 通态压降的 IGBT。另外,IGBT 在 1/2~1/3 额定电流以下的区域,其温度系数为负值。

4)安全工作区宽。与 GTR 相比,具有较高的耐短路电压能力。1000V 的 GTR 允许短路电压在基极驱动时一般为 600V,大于此值开断时,在数微秒内由短路电流与所加电压乘积来决定的瞬时功率会引起器件破坏,但是 1000V 的 IGBT 在 700V 以上,10 μ s 后仍然正常工作。

5)并联容易。IGBT 在大电流区域通态电压温度倍数是正的,具有耐脉冲特性、易并联。

6) IGBT 是常开型器件。

综合上述特点, IGBT 被认为是理想的新型功率半导体器件, 它的应用领域正在急速扩大, 在电机调速、中频电源、开关电源等领域中, IGBT 有取代 MOSFET 和 GTR 的趋势。目前开关频率 20kHz 的 IGBT 电流型逆变器已经问世。由于它的频率高、电压和电流波形失真小, 效率为 95%。它用于 UPS 的 IGBT 40kVA、65kHz 逆变电源已开发成功, 与 GTR 相比, 它具有高效、低噪音等优点。

(2) MCT 初露锋芒

MCT 是 80 年代后期初露锋芒的又一理想大功率半导体器件, 它是 MOSFET 与晶闸管的复合器件。MCT 是电压控制器件, 具有两个 MOS 门极, 以一个 MOS 门极作为晶闸管的开通门极, 另一个 MOS 门极作为晶闸管的关断门极。因此, 它兼有晶闸管的高电压、大电流的特性和 MOSFET 的快速开关的功能。MCT 具有如下的优点:

1) 高电压、大电流。MCT 具有晶闸管的高电压、大电流的大功率特点。现已制出 2000V、300A, 1000V、1000A 的器件。在电阻性负载下可关断电流达到每平方厘米几千安培, 如一个元胞器件在 $V=60V$ 时可关断电流密度为 $6000A/cm^2$; $V=15V$ 时可关断电流密度为 $2000A/cm^2$, 它是普通晶闸管浪涌电流的 2 倍, 是 GTO 的可关断电流的 5~10 倍。因此, 从容量看, MCT 是大有前途的功率半导体器件。

2) 通态压降低, 约为 IGBT 的 1/3。

3) 开通快, 可以工作在 20kHz 以上。

4) di/dt 、 dV/dt 的耐量极高。

可以认为, MCT、IGBT 等复合器件的问世, 它们是分立功率半导体器件的一次革命性的变革。由于这些器件具有电流密度大、工作频率高、控制功率小、易驱动、可采用低成本的集成驱动电路控制等优点, 不仅在现有的功率电子应用中可以充分发挥其作用, 而且将能扩展功率电子应用领域, 给功率电子技术注入新的动力。目前各类功率 MOS 复合器件约占市场的 10%, 1995 年将占 50% 以上, 即在相当范围内可取代 MOSFET、GTR、GTO 和 SCR 的作用。

5. 功率 IC 已进入功率半导体市场

功率集成电路 (P-IC) 包括功率高压集成电路 (HVIC)、功率智能集成电路 (SMART power IC) 和功率专用集成电路 (S-IC)。1981 年美国试制出第一个 P-IC, 1985 年进入功率半导体市场。目前 HVIC 的水平为 500V、600mA, 用于长途通信电路。另一种 HVIC 为 80V、20A, 开关频率为 200kHz, 用于平板发光屏显示驱动装置和长途电话的功率变换装置。Smart power IC 水平为 110V、13A, 500V、0.5A, 用于感应交流电机的传动。P-IC 是功率半导体器件技术与微电子技术结合的产物, 其根本特征是使动力与信息合一, 成为机和电的关键接口, 是机电一体化的基础元器件。

6. 智能化模块将产生新一代功率电子装置

智能化功率半导体器件就是将功率半导体器件与具有信号处理功能、自我保护功能、各种诊断功能等的电路集成或组装在一起的功率半导体器件。因此它分为两类: 一类是集成在一个硅片上, 如上述功率 IC; 另一类是封装成一个模块。

智能模块是为了适应功率电子装置小型轻量、简化设计和提高装置可靠性等要求而发展起来的。现在已生产 600V、30A 和 50A、75A 逆变器用智能模块。表 1-1 列出逆变器