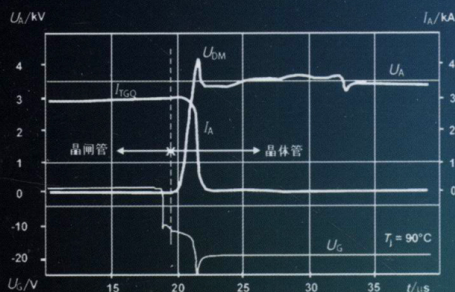


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎ 王彩琳 编著

电力半导体新器件 及其制造技术

DIANLI BANDAOTI XINQIJIAN JIQI ZHIZAO 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

电力半导体 新器件及其制造技术

王彩琳 编著



机械工业出版社

本书介绍了电力半导体器件的结构、原理、特性、设计、制造工艺、可靠性与失效机理、应用共性技术及数值模拟方法。内容涉及功率二极管、晶闸管及其集成器件（包括 GTO、IGCT、ETO 及 MTO）、功率 MOSFET、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）以及电力半导体器件的功率集成技术、结终端技术、制造技术、共性应用技术、数值分析与仿真技术。重点对功率二极管的快软恢复控制、GTO 的门极硬驱动、IGCT 的透明阳极和波状基区、功率 MOSFET 的超结及 IGBT 的电子注入增强（IE）等新技术进行了详细介绍。

本书可作为电子科学与技术、电力电子与电气传动等学科的本科生、研究生专业课程的参考书，也可供从事电力半导体器件制造及应用的工程技术人员和有关科技管理人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电力半导体新器件及其制造技术/王彩琳编著. —北京：机械工业出版社，2014.9

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 978-7-111-47572-9

I. ①电… II. ①王… III. ①电力系统—电子器件—生产工艺
IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 170024 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：罗 莉 责任编辑：罗 莉

版式设计：赵颖喆 责任校对：樊钟英

封面设计：马精明 责任印制：李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2015 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·35.5 印张·7.2 千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-47572-9

定价：99.00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

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.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、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

电力电子技术是利用电力半导体器件实现电能的变换和控制，目前已广泛地应用于国民经济的各个领域。电力半导体器件是电力电子技术的基础，是电力电子装置的核心部件，决定了电力电子系统的性能与可靠性。电力半导体器件是以半导体物理为理论基础、半导体制造技术为核心，属电力电子学与微电子学交叉领域。随着电力半导体器件的快速发展，越来越受到研究者和使用者的关注。

作者致力于电力半导体器件的学习与研究已有三十年，曾在西安电力电子技术研究所半导体工艺线上从事过晶闸管、GTR、GTO 等器件研发工作，参与了电力半导体器件的设计、研制、生产及测试等全过程，自在西安理工大学从教十五年来，对电力半导体器件的基本理论和专业知识有了更深入的理解，在电力半导体器件的计算机辅助设计与数值分析方面也积累了丰富的经验，同时掌握了电力半导体新器件、新工艺等前沿知识。

在长期的教学和研究工作中，作者深深地体会到，要真正掌握电力半导体器件的制造与应用技术，需要深入了解电力半导体器件的结构与工作原理。本书正是在这样的背景下编写的，力求从电力半导体器件的结构和工作原理的角度诠释和分析其电热特性及失效机理。全书共分为 10 章，第 1 章是电力半导体器件技术概述，主要介绍了电力半导体器件的归属关系、定义、分类及发展趋势等；第 2 章主要介绍了功率二极管的结构、原理及特性等；第 3 章主要介绍了晶闸管及其集成器件的结构类型、原理、特性及设计方法和应用可靠性技术；第 4 章简述了功率 MOSFET 与超结 MOSFET 的结构、原理、特性及设计方法和应用可靠性技术；第 5 章重点介绍了绝缘栅双极晶体管（IGBT）结构、原理及特性，并简要介绍了 IGBT 派生结构与 SJIGBT 的特性，以及 IGBT 的设计方法与应用可靠性和失效问题；第 6 章是电力半导体器件的功率集成技术，主要介绍了功率集成电路（PIC）和功率模块（PM）的衬底材料制备技术、PIC 中横向高压器件的结构、特性及隔离技术，以及功率模块的特性、内部各种电连接与散热等技术；第 7 章是电力半导体器件的结终端技术，主要介绍了结终端结构的设计方法与耐压机理，并针对浅结器件和深结器件分别介绍了几种新的终端结构；第 8 章是电力半导体器件的制造技术，详细介绍了衬底材料制备技术、芯片制造的基本工艺技术、封装技术，以及寿命控制与硅-硅直接键合等特殊技术；第 9 章介绍了电力半导体器件的驱动、串并联、保护及热传导等应用共性技术；第 10 章介绍了电力半导体器件的数值分析与仿真技术，以及常用软件的使用方法。

本书的编写内容结合了作者多年来在电力半导体器件方面的研究成果。书中关于 SJMOS 的仿真工作由硕士生孙军同学完成, TPMOS 的仿真工作由硕士生孙丞、庞超同学完成, IGCT 的仿真工作分别由硕士生孙永生、付凯、孙海刚及王允等同学完成, IGBT 的仿真工作由硕士生贺东晓同学完成, LDMOS 的仿真工作由硕士生于凯同学完成, 结终端的仿真工作由硕士生王一字同学完成, 热特性的仿真工作由硕士生杨鹏飞同学完成, 在此对他们的工作表示感谢。此外, 在本书的校对过程中还得到了硕士生张军亮、赵晨凯、高秀秀、张磊、井亚会、杨晶、李丹及刘雯娇等同学的支持, 在此也一并表示感谢。

本书编写过程中, 得到了西安理工大学陈治明教授、聂代祚教授, 以及西安工程大学高勇教授的支持和帮助, 特别是聂代祚教授对本书的内容提出了非常好的修改意见, 在此深表感谢。本书中的 IGCT 与快速软恢复二极管等内容是在国家自然科学基金项目 (50877066, 51077110) 资助下完成的, 在此对国家自然科学基金委的大力资助表示衷心感谢!

本书内容涉及面较宽, 由于作者水平有限, 编写时间较长, 且电力半导体器件处于快速发展之中, 书中难免有错漏之处, 恳请广大读者批评指正。

本书编写提纲曾由“电力电子新技术系列图书”编委会组织审查, 并提出宝贵意见, 作者在此向他们深表谢意。

作者

2014 年 2 月于西安

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 电力半导体器件概述 1

1.1.1 与电力电子技术关系 1

1.1.2 定义与分类 3

1.2 发展概况 6

1.2.1 电力半导体器件的发展 6

1.2.2 制造技术的发展 10

参考文献 13

第 2 章 功率二极管 14

2.1 普通功率二极管 14

2.1.1 结构类型 14

2.1.2 工作原理与 $I-U$ 特性 15

2.1.3 静态与动态特性 17

2.2 快速软恢复二极管 24

2.2.1 结构类型 25

2.2.2 软恢复的机理及控制 28

2.3 功率肖特基二极管 35

2.3.1 结构类型与制作工艺 36

2.3.2 工作原理与 $I-U$ 特性 38

2.3.3 静态特性 39

2.4 功率二极管的设计 43

2.4.1 普通功率二极管的设计 43

2.4.2 快速软恢复二极管的设计 45

2.4.3 功率肖特基二极管的设计 47

2.5 功率二极管的应用与失效分析 48

2.5.1 安全工作区及其限制因素 48

2.5.2 失效分析 51

2.5.3 特点与应用范围 53

参考文献 54

第 3 章 晶闸管及其集成器件 57

3.1 普通晶闸管结构 57

3.1.1 结构类型 57

3.1.2 工作原理与特性 60

3.1.3 静态与动态特性 65

3.2 门极关断晶闸管 (GTO) 76

3.2.1 结构概述 76

3.2.2 工作原理与特性 79

3.2.3 静态与动态特性 82

3.2.4 硬驱动技术 86

3.3 集成门极换流晶闸管 (IGCT) 88

3.3.1 结构特点 88

3.3.2 工作原理与 $I-U$ 特性 92

3.3.3 静态与动态特性 97

3.3.4 关键技术及其原理 100

3.3.5 驱动电路与特性参数 111

3.4 其他集成器件 116

3.4.1 发射极关断晶闸管 (ETO) 116

3.4.2 MOS 关断晶闸管 (MTO) 119

3.5 晶闸管的设计 122

3.5.1 设计方法概述 122

3.5.2 超高压晶闸管的设计 125

3.5.3 大电流 GTO 的设计 128

3.5.4 IGCT 的设计 131

3.6 晶闸管的应用可靠性与

失效分析 136

3.6.1 普通晶闸管的失效分析 136

3.6.2 GTO 的可靠性与

失效分析 138

3.6.3 IGCT 的可靠性与

失效分析 142

3.6.4 晶闸管的特点与

应用范围 149

参考文献 150

第4章 功率 MOSFET	155
4.1 功率 MOSFET 的结构类型及特点	155
4.1.1 基本结构	156
4.1.2 横向结构	158
4.2 功率 MOSFET 的工作原理与特性	159
4.2.1 等效电路	159
4.2.2 工作原理与特性参数	160
4.2.3 静态与动态特性	167
4.3 超结 MOSFET	180
4.3.1 基本结构及等效电路	181
4.3.2 派生结构	182
4.3.3 静态与动态特性	185
4.4 功率 MOSFET 的设计	190
4.4.1 纵向结构的设计	190
4.4.2 横向结构的设计	191
4.5 功率 MOSFET 的应用可靠性与失效分析	194
4.5.1 应用可靠性	194
4.5.2 失效分析	196
4.5.3 特点与应用范围	201
参考文献	201
第5章 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	205
5.1 普通 IGBT	205
5.1.1 结构特点与典型工艺	205
5.1.2 工作原理与 $I-U$ 特性	211
5.1.3 静态与动态特性	218
5.2 注入增强型 IGBT	234
5.2.1 结构特点与典型工艺	234
5.2.2 工作原理与注入增强效应	238
5.2.3 静态与动态特性	242
5.3 集成化 IGBT	245
5.3.1 逆阻 IGBT	245
5.3.2 双向 IGBT	247
5.3.3 逆导 IGBT	249
5.3.4 双模式 IGBT	253
5.3.5 超结 IGBT	254

5.4 IGBT 的设计	257
5.4.1 纵向结构的设计	257
5.4.2 横向结构的设计	260
5.4.3 防门锁的设计	264
5.5 IGBT 的应用可靠性与失效分析	266
5.5.1 可靠性	266
5.5.2 失效分析	273
5.5.3 应用与发展趋势	280
参考文献	282
第6章 功率集成技术	287
6.1 功率集成技术简介	287
6.1.1 功率集成概念	287
6.1.2 功率集成形式	287
6.1.3 功率集成意义	288
6.2 功率集成电路	289
6.2.1 概述	289
6.2.2 电场调制技术	290
6.2.3 横向高压器件	292
6.2.4 隔离技术	308
6.2.5 设计技术	314
6.2.6 发展与应用范围	318
6.3 功率模块	320
6.3.1 概述	320
6.3.2 基本构成	321
6.3.3 封装技术	325
6.3.4 特能与可靠性	333
6.3.5 失效分析与安全性	339
6.3.6 发展趋势	341
参考文献	342

第7章 电力半导体器件的结终端技术	347
7.1 常见的结终端技术	347
7.1.1 平面结终端技术	347
7.1.2 台面结终端技术	352
7.1.3 结终端特性的表征	357
7.1.4 结终端的制作工艺	358
7.2 常用结终端结构	359
7.2.1 功率二极管的结终端结构	360

7.2.2 MOS 型浅结器件的结终端结构	361	参考文献	443
7.2.3 晶闸管的结终端结构	363	第 9 章 电力半导体器件的应用	
7.2.4 HVIC 的结终端结构	365	共性技术	449
7.3 结终端结构的设计	366	9.1 电力半导体器件的驱动电路	449
7.3.1 概述	366	9.1.1 概述	449
7.3.2 浅结器件复合结终端的设计	369	9.1.2 电流驱动	450
7.3.3 深结器件复合结终端的设计	372	9.1.3 电压驱动	453
参考文献	376	9.2 电力半导体器件的串并联技术	455
第 8 章 电力半导体器件的制造技术	380	9.2.1 概述	455
8.1 概述	380	9.2.2 功率二极管的串并联	456
8.1.1 发展概况	380	9.2.3 普通晶闸管的串并联	458
8.1.2 主要制造技术内容	381	9.2.4 GTO 的串并联	460
8.2 衬底材料制备技术	382	9.2.5 IGCT 的串并联	462
8.2.1 硅衬底	382	9.2.6 IGBT 模块的串并联	465
8.2.2 SOI 衬底	384	9.3 电力半导体器件的过应力保护	469
8.3 基本制造工艺	385	9.3.1 概述	469
8.3.1 热氧化	385	9.3.2 保护元器件	473
8.3.2 热扩散	388	9.3.3 吸收电路	476
8.3.3 离子注入	398	9.3.4 保护电路	477
8.3.4 光刻与刻蚀	403	9.3.5 软开关技术	485
8.3.5 化学气相淀积	410	9.4 电力半导体器件的热传输与热分析	486
8.3.6 物理气相淀积	413	9.4.1 功耗	486
8.3.7 背面减薄工艺	414	9.4.2 热传输与热阻	488
8.3.8 PIC 典型工艺	415	9.4.3 热分析	493
8.4 寿命控制技术	417	9.5 电力半导体器件的合理使用	496
8.4.1 少子寿命	417	9.5.1 可靠性	496
8.4.2 吸杂技术	419	9.5.2 有效保护	497
8.4.3 辐照技术	421	9.5.3 降额使用	498
8.4.4 应用举例	426	参考文献	498
8.5 硅-硅直接键合技术	429	第 10 章 电力半导体器件的数值分析与仿真技术	500
8.5.1 技术特点	429	10.1 数值分析方法	500
8.5.2 键合的机理与方法	430	10.1.1 概述	500
8.5.3 应用举例	432	10.1.2 电特性仿真	502
8.6 封装技术	438	10.1.3 热特性仿真	504
8.6.1 中小功率器件的封装	438	10.2 MEDICI 软件使用实例	506
8.6.2 大功率器件的封装	441	10.2.1 使用方法	506

10.2.2 仿真实例 508

10.3 ISE 软件使用实例 519

10.3.1 DIOS 模块 519

10.3.2 MDRAW 模块..... 523

10.3.3 DESSIS 模块 533

10.4 ANSYS 软件使用实例 542

10.4.1 软件介绍 543

10.4.2 分析实例 544

参考文献 554

第 1 章 绪 论

本章阐述了电力半导体器件与电力电子技术之间的关系，主要介绍了电力半导体器件的定义、分类及发展概况。

1.1 电力半导体器件概述

1.1.1 与电力电子技术关系

1. 电力电子技术

电力电子技术是一门新兴的应用于电力领域的电子技术，它与信息电子技术共同构成了电子技术。因两者处理的对象不同，考虑的关键问题也不同。信息电子技术包括模拟电子技术与数字电子技术，主要用于信息检出、传送和处理，多用于低电平电路，对效率要求低（ $<15\%$ ），可以不考虑转换效率和散热等问题；而电力电子技术则包括电力半导体器件与电力电子变流技术，主要用于电力传送、变换、控制或开关，对效率要求较高（ $>85\%$ ），必须优先考虑转换效率和散热等问题。电力电子技术所变换的“电力或功率（Power）”可大到数百兆瓦（MW）甚至吉瓦（GW），也可小到数瓦（W）甚至毫瓦（mW）级，根据功率大小可分为大功率、中功率及小功率。通常把电力电子电路中能实现电能变换和控制的器件称为电力电子器件（Power Electronic Device）。由于它是采用半导体材料制成的，也称为电力半导体器件（Power Semiconductor Device）或简称为功率器件（Power Device）。

从工程技术领域与学术角度讲，电子技术对应于电子学，信息电子技术对应于微电子学，电力电子技术对应于电力电子学。电力电子学是以电力电子技术为研究对象的电子学。1974 年，美国学者 W. Newell 提出电力电子学是由电力、电子和控制理论三个学科交叉而形成的，并用倒三角形对电力电子学进行了描述，被全世界普遍接受。目前，随着电力电子学不断发展，电力电子技术被赋予新的定义，如图 1-1 所示^[1]，由电子科学与技术、电气工程与技术及控制理论组成。其研究内容涉及数字电路、模拟电路、控制理论、电力半导体器件、电力变换电路与系统、信息技

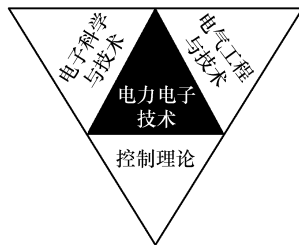


图 1-1 电力电子技术的定义

术、微电子技术、计算机应用及其计算机辅助设计（CAD）技术等，覆盖了材料、器件、电路与控制、磁学、热设计、封装、制造、电力及电工应用等，已逐渐发展成为多学科相互渗透的综合性技术学科。目前，电力电子技术几乎渗透到国民经济的各行各业，已成为现代社会的支撑科技，在推动科学技术和经济发展中发挥着越来越重要的作用。

电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率变换与控制，或是对电机运动实现精密的控制。电力半导体器件的性能决定了电力电子应用技术水平，同时电力电子技术发展对电力半导体器件提出了更高的要求，又促进了新型电力半导体器件的发展。

电力半导体器件是以半导体物理为理论基础，以半导体制造技术为核心。新型电力半导体器件的发展，越来越多地体现了微电子技术的特征，同时微电子技术也向功率系统芯片（Power System on Chip, PSOC）发展。可见，电力电子技术与微电子技术相结合已成为当今技术发展的主流。

2. 电力电子系统组成

电力电子系统是由控制电路、驱动电路和以电力半导体器件为核心的主电路组成的，如图 1-2 所示^[2]。控制电路按系统的工作要求形成控制信号，通过驱动电路去控制主电路中电力半导体器件的开通或关断，来完成整个系统的功能。检测电路主要是对主电路或应用现场的信号进行检测，并转换为控制电路所能接收的信息。驱动电路是将控制电路传递的信息（电压、电流）转换为可以被主电路所接收的信息。在主电路和控制电路之间附加一些保护电路，以保证电力半导体器件和整个电力电子系统正常可靠运行。因为主电路中有电压和电流的冲击，而电力半导体器件承受过电压和过电流的能力有限，所以保护电路是非常必要的。

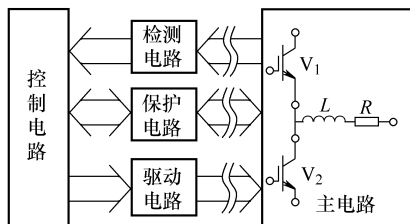


图 1-2 电力电子系统的组成

从广义上讲，往往将主电路以外的其他电路都归为控制电路。可以说，电力电子系统是由主电路和控制电路组成的。由于主电路中的电流和电压一般都较大，而控制电路中的电流和电压较小。所以，在主电路和控制电路连接的路径上需要进行电气隔离，通过光、磁等来传递信号。

电力电子技术传统的应用主要包括电能的高效率变换，为计算机、通信、自动化装置、仪表、工业装置等提供高质量交流或直流电源，以及工业过程中运动的高效率、精密及快速控制。目前，电力电子技术新应用主要是节约资源、开发新能源、电力环境治理、节能降耗及环境保护。

1.1.2 定义与分类

电力半导体器件是电力电子技术的基础，也是电力电子系统的核心部件，被誉为电力电子产品的“中央处理器（CPU）”。离开了电力半导体器件，电力电子技术将成为“无米之炊”。

1. 定义与特征

在电力半导体器件标准中，通常将电力半导体器件定义为基本特性由半导体内载流子流动决定，并主要用于电力的变换、调节和开关的器件^[3]，也可称之为进行功率处理的半导体器件^[4]。典型的功率处理功能包括变频、变压、变流、功率放大和功率处理等。

理想的电力半导体器件通常工作在饱和导通或阻断两种工作状态。在饱和导通状态时，器件能够通过很大的电流，且通态压降很小；在阻断状态时，器件能够承受很高的阻断电压，且有极小的漏电流。此外，还要求器件能在通态与断态之间快速转换，在所有工作状态下的损耗都很小，近似于理想开关。

图1-3 比较了电力半导体器件理想的 $I-U$ 特性与实际的 $I-U$ 特性。可见，理想的器件特性是断态时器件能承受无限高的电压，通态时器件能通过无限大的电流，并且能在断态与通态之间快速转换。实际器件的阻断电压和通流能力有限，并且通、断之间的转换不是瞬时完成的，要经过一个转换过程，所需转换时间称为开关时间。在开关过程中，开关时间越长或开关频率越高，开关功耗越大。

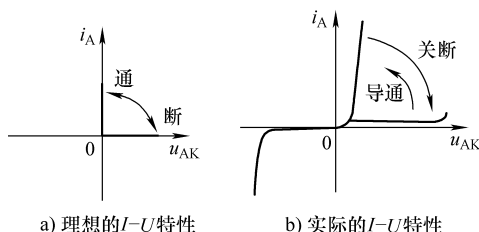


图1-3 电力半导体器件 $I-U$ 特性

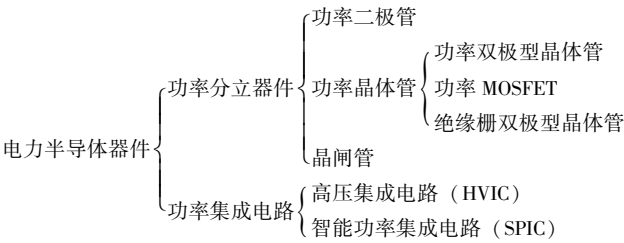
就应用要求而言，电力半导体器件除了具有尽可能低的静态损耗和开关损耗外，还要能承受很高的浪涌电流（电流在数十毫秒的瞬间数倍于稳态值）冲击以及关断过程中高电压引起的动态雪崩。

2. 电力半导体器件的分类

电力半导体器件主要分为功率分立器件（Power Discrete Devices）与功率集成电路（Power Integrated Circuit, PIC）两大类，见表1-1。功率分立器件主要包括功率二极管（Power Diode）、功率晶体管（Power Transistor）及晶闸管（Thyristor）。其中，功率晶体管又包括功率双极型晶体管（Power Bipolar Transistor）、功率金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET）及绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）。功率集成电路（Power Integrated Circuit, PIC）包括智能功率集成电路（Smart Power In-

egrated Circuit, SPIC) 和高压集成电路 (High Voltage Integrated Circuit, HVIC)。如果从工作机理与组成来分, 功率二极管、功率双极型晶体管及晶闸管均属于双极型器件, 功率 MOSFET 属于 MOS 型器件, IGBT 则属于 MOS 双极型复合器件。

表 1-1 电力半导体器件的分类



功率集成电路 (PIC) 是把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起的。目前, 电源管理集成电路 (Power Management Integrated Circuit) 也被纳入 PIC 的范畴。将功率器件与其过电压、过电流、过热等传感与保护电路及驱动和控制电路等集成于同一芯片, 可形成智能功率集成电路 (SPIC); 或通过模块的形式封装在一起形成智能功率模块 (Intelligent Power Module, IPM)。

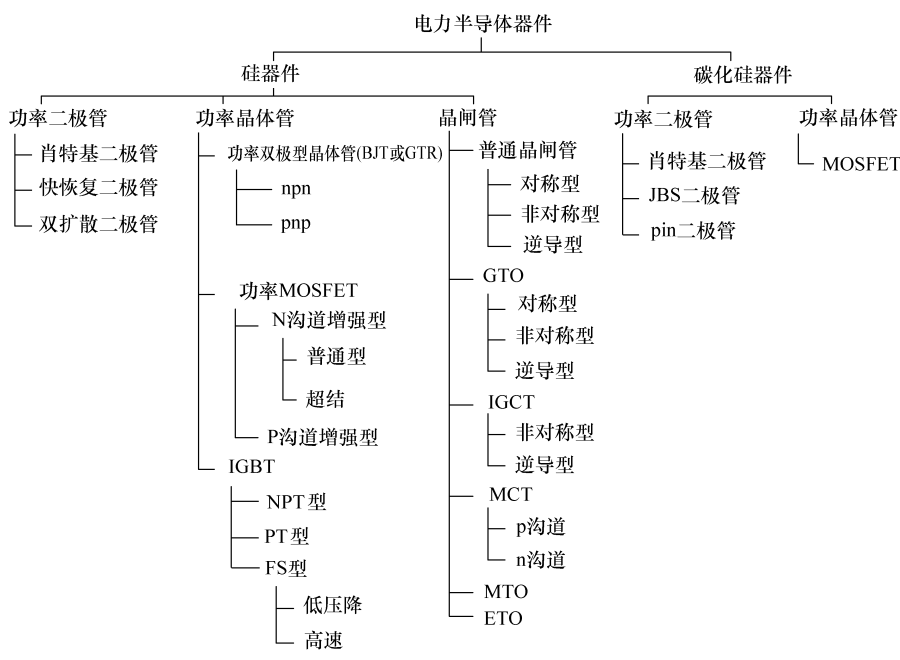
表 1-2 给出了电力半导体分立器件的分类及其派生系列器件^[5]。按材料不同来分, 目前主要有硅器件和碳化硅器件。按器件结构不同来分, 有对称 (Symmetry) 型与非对称 (Asymmetry) 型, 或者非穿通 (Non - Punch Through, NPT) 型与穿通 (Punch Through, PT) 型, 逆导型与逆阻型等。按制作工艺不同来分, 功率二极管可分为功率肖特基二极管 (Power Schottky Diode)、外延快恢复二极管及双扩散整流二极管; 功率晶体管可分为功率双极型晶体管、功率 MOSFET 及复合型 IGBT; 晶闸管可分为普通晶闸管、快速晶闸管、门极关断 (Gate Turn - Off, GTO) 晶闸管 (简称为 GTO)、集成门极换流晶闸管 (Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)、MOS 控制晶闸管 (MOS - Control Thyristor, MCT)、MOS 关断 (MOS Turn - Off, MTO) 晶闸管 (简称为 MTO) 及发射极关断 (Emitter Turn - Off, ETO) 晶闸管 (简称为 ETO) 等, 其中 IGCT、MTO 及 ETO 都是由 GTO 派生的集成器件。碳化硅器件主要包括碳化硅功率二极管和碳化硅功率晶体管。

3. 特点

双极型器件用电流来控制, 输入阻抗低, 驱动功率大。由于导通期间内部有少数载流子 (简称为少子) 存储, 会发生电导调制效应, 所以通态压降低, 电流容量大, 阻断电压高。同时开关速度慢, 容易发生热集中或二次击穿, 导致安全工作区 (Safe Operating Area, SOA) 较窄。

功率 MOSFET 用电压来控制, 输入阻抗高, 驱动功率小。导通期间内部无少子存储, 故开关速度快, 同时导通电阻较高, 使得阻断电压和电流定额也较小。导通电阻具有正的温度系数, 不会发生热集中, 故 SOA 较宽。

表 1-2 电力半导体分立器件的分类及其派生器件



MOS - 双极型复合器件是将 MOS 型器件和双极型器件有机地结合成一体，用 MOS 型器件作为输入端，双极型器件作为输出端，实现用很小的功率来驱动或控制很大的功率，具有双极型和 MOS 型器件的共同优点。

4. 应用

电力电子系统要求电力半导体器件必须工作在一个很宽的功率和频率范围。如图 1-4a 所示^[6]，电力半导体器件的应用场合与工作频率有关。大功率系统，如高压直流（HVDC）输电的电力传输、电力机车牵引等，需要兆瓦级功率控制，工作频率相对较低。随着工作频率增加，器件的功率容量逐渐下降，如典型的微波器件的处理功率仅为 100W。对现有的硅器件而言，晶闸管更适合低频率、大功率使用，IGBT 适合中频率、中功率使用，功率 MOSFET 适合高频率、小功率使用。

电力半导体器件应用的另一种分类方法是依据电流和电压处理需求来划分，如图 1-4b 所示。晶闸管处理的电流和电压分别在 2kA 和 6kV 以上，单个器件就可以控制 10MW 以上的功率。这些器件适合 HVDC 输电的电力传输和电力机车牵引应用。对于工作电压要求在 300 ~ 3000V 范围、电流处理能力较强的功率系统应用，IGBT 是最佳选择。当电流要求在 1A 以下时，PIC 可以提供更多的功能，如电信系统与显示驱动等。当电流超过几安培时，用性价比高的功率 MOSFET，更适用于汽车电子和开关电源。总之，没有单个器件结构能适合所有的应用，所以未来的器件