



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十一五”规划教材

ADVANCED POWER ELECTRONICS

高等电力电子技术

张 兴 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

高等电力电子技术

张 兴 主 编
杜少武 杨淑英 姜卫东 王庆龙 参 编
王付胜 刘 淳 谢 震



机械工业出版社

本书是编者根据电力电子技术教学与科研经验,在学习、研究国内外教材及相关参考文献的基础上编写而成的,适用于“电力电子技术”课程的研究生教学,是对相关本科教材的深入与完善。本书以“电力电子技术”理论为基础,从电力电子系统研究与技术角度出发,深入浅出地讨论了电力电子器件、电力电子拓扑基础、开关变换器的建模、控制系统设计、空间矢量 PWM 技术、电力电子技术 MATLAB 仿真、软开关变换器、电力电子装置中的电磁器件与电磁兼容以及电力电子器件的热设计等内容,为电力电子功率变换系统的研究提供了理论基础。

本书可作为电气工程及其自动化等专业和相关专业方向的研究生课程教材,同时也可作为本科生和从事电力电子技术及相关研究的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高等电力电子技术/张兴主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 2

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材
ISBN 978-7-111-31338-0

I. ①高… II. ①张… III. ①电力电子学—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 137769 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:于苏华 责任编辑:于苏华 谷玉春 版式设计:张世琴
责任校对:陈延翔 封面设计:王洪流 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23 印张 · 566 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-31338-0

定价:46.00 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

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编审委员会

主任委员 汪樵生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这套教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. 适用性：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. 示范性：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. 创新性：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. 权威性：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、

资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有力保障。

此套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

前 言

电力电子技术是在电子、电力与控制技术的基础上发展起来的一门新兴交叉学科，被国际电工委员会(IEC)命名为电力电子学(Power Electronics)或称为电力电子技术。近20年来，电力电子技术已渗透到国民经济各领域，并取得了迅速的发展。作为电气工程及其自动化、自动化或本科相关专业的一门重要的专业基础课，“电力电子技术”课程讲述了电力电子器件、电力电子电路及变流技术的基本理论、基本概念和基本分析方法，为后续专业课程的学习和电力电子技术的研究与应用打下良好的基础。

然而，由于本科教学及学时等方面因素的影响，本科阶段的“电力电子技术”课程重在入门和打基础，其内容大都集中于电力电子电路与变流技术，有关电力电子建模、控制、仿真以及电力电子的热设计与电磁技术等内容涉及相对较少，因此在实际从事电力电子技术研究与应用时还需进一步充实和学习。另外，由于电力电子技术已是电气工程与自动化领域研究和应用的重要基础，一些高校在研究生阶段也开设了相应的课程，如现代电力电子技术、高频功率电子学等，但也有不少高校相关学科的研究生主要通过自学来从事电力电子技术的研究。因此，很有必要编写一本与本科“电力电子技术”课程相衔接，并适用于研究生阶段教学的教材。

然而，如何能编好一本适用于研究生的电力电子技术课程的教材对笔者而言一直感到是一件非常困难之事：首先，电力电子技术发展日新月异，新内容、新思想、新概念层出不穷，要系统阐述则笔者水平远不能及；其次，研究生课程的主要内容应能与电力电子技术研究相结合，既要有一定的深度又要有一定的广度，这对于学时少的研究生课程教学不能不说是一件难以两全之事；再者，如何通过有限内容的阐述与教学使读者能掌握电力电子技术研究的思路、方法、规律，进而能举一反三则是难上加难之事；最后，关于这本教材的名称更是难以定夺，一来要体现与本科教材的衔接，二来要反映研究生教材一定的深度、广度和研究特色，由于是对本科“电力电子技术”课程的拓展和深入，因此，最后也就以“高等电力电子技术”为名了。

在内容阐述方法上，本书重视研究型思维训练，注重创新能力的培养。本书力图打破传统教材以讲清知识点为主的对已知系统的解析模式，在传授基本理论和基本概念的同时，重视了对研究对象问题的提出、方案对比与改进、分析思路等研究能力的训练，尤其强调对电力电子系统的综合研究和设计能力的培养，从而努力提高工程技术研究的自主创新能力。

在内容体系的安排上，本书针对研究生教学的特点，力图避免新技术、新理论的简单罗列，在本科生教材《电力电子技术》的基础上，抓住电力电子技术研究的系统理论和关键技术问题，较为系统地阐述了电力电子器件发展概述、电力电子拓扑基础、开关变换器的建模、控制系统、空间矢量PWM技术、电力电子技术MATLAB仿真、软开关变换器、电力电子装置中的电磁器件与电磁兼容性、电力电子器件的热设计等内容，为电力电子技术研究提供了理论和技术基础。

本书由合肥工业大学张兴教授主编，其中张兴教授编写了全书大纲、前言以及第2、4、

5章,杜少武教授编写了第7章,杨淑英副教授编写了第3章,姜卫东副教授编写了第8章,王庆龙副教授编写了第6章,王付胜副教授编写了第9章,刘淳博士编写了第1章,全书思考题由谢震副教授整理,全书由张兴教授统稿。

在本书的编写过程中,得到了合肥工业大学王孝武教授、张崇巍教授、丁明教授、方敏教授的关心与指导,同时也得到了研究生的大力协助,他们以读者的视觉提出了很多宝贵意见和建议,并进行了大量文档、绘图等工作。参与协助的研究生有:刘芳、周小义、陈威、黎琴、李少林、谭理华、丁杰、李飞、王莹、江涛、伍瑶、陈玲、董文杰、刘萍、金鸣凤、余畅舟、卢磊、郝木凯、朱德斌等,在此一并表示衷心的感谢。

作 者

目 录

序	
前言	
第 1 章 电力电子半导体器件	1
1.1 电力电子器件发展概述	1
1.1.1 功率二极管	1
1.1.2 晶闸管	3
1.1.3 电力晶体管	4
1.2 功率 MOSFET	4
1.2.1 沟槽型 MOSFET	4
1.2.2 “超级结”结构	5
1.2.3 COOLMOS	6
1.3 绝缘栅双极型晶体管	7
1.3.1 应用于 IGBT 的新器件制造技术	8
1.3.2 穿通型 IGBT	9
1.3.3 非穿通型 IGBT	9
1.3.4 场终止型 IGBT	10
1.3.5 其他新型 IGBT	11
1.4 集成门极换向晶闸管的结构与工作原理	11
1.4.1 IGCT 的结构和特点	11
1.4.2 IGCT 的工作原理	13
1.5 电力电子器件新材料	14
1.5.1 碳化硅材料和碳化硅电力电子器件	14
1.5.2 砷化镓器件	18
1.5.3 金刚石电力电子器件	18
1.6 电力电子集成技术	18
1.6.1 集成技术的不同层次和形式	19
1.6.2 电力电子集成发展面临的技术问题	20
参考文献	21
第 2 章 电力电子拓扑基础	23
2.1 开关变换器拓扑概述	23
2.1.1 开关变换器的基本拓扑	23
2.1.2 开关变换器拓扑的基本开关单元	26
2.1.3 基本开关变换器的拓扑组合规则	28
2.2 开关变换器拓扑的对偶法设计	33
2.2.1 平面电路的对偶及其对偶规则	33
2.2.2 开关变换器的对偶设计	37
2.3 开关变换器拓扑的三端开关模型法设计	45
2.3.1 基本 DC-DC 开关变换器“三端开关”模型电路	45
2.3.2 三端开关模型的软开关变换电路	48
2.3.3 PWM 软开关变换器模型电路	53
2.4 开关变换器的拓扑叠加设计	54
2.4.1 基本开关变换器级联叠加的基本规则	55
2.4.2 基本开关变换器的级联叠加设计举例	56
2.4.3 DC-DC 开关变换器级联叠加时的功率开关单元拓扑简化	58
2.4.4 DC-AC 开关变换器基本单元的拓扑叠加设计	62
参考文献	67
第 3 章 开关变换器的建模分析	69
3.1 概述	69
3.2 状态空间平均法	70
3.2.1 状态空间的基本定义	71
3.2.2 开关变换器的状态方程	72
3.2.3 连续导通模式下的状态空间平均法	77
3.2.4 不连续导通模式时的状态空间	

平均法	78	5.2 三维空间矢量脉宽调制技术	166
3.3 PWM 开关模型法	83	5.2.1 三维空间矢量概述	167
3.3.1 PWM 开关的基本定义	83	5.2.2 三相四桥臂逆变器的静止电压 矢量	167
3.3.2 PWM 开关的端口特性	84	5.2.3 三维空间矢量轨迹合成	169
3.3.3 PWM 开关的等效电路模型	85	5.3 三电平空间矢量 PWM 技术	175
3.3.4 开关变换器的 PWM 开关模型	86	5.3.1 三电平空间矢量概述	175
3.4 等效变压器法	89	5.3.2 查表式 SVPWM 矢量发生	177
3.4.1 开关电路的等效变压器描述	89	5.3.3 基于参考电压分解的 SVPWM 简化 算法	182
3.4.2 三相 VSR 等效变压器 dq 模型 电路	91	5.4 三值逻辑空间矢量 PWM 技术	189
3.4.3 三相 VSR 动静特性分析	94	5.4.1 三值逻辑 PWM 信号发生	190
3.5 开关变换器离散平均模型	104	5.4.2 三值逻辑空间矢量 PWM 信号发生	192
3.5.1 离散化原理和建模分析	105	5.4.3 低电压应力三值逻辑 PWM 信号发生	197
3.5.2 开关变换器的离散平均模型	106	参考文献	202
参考文献	110	第 6 章 电力电子技术 MATLAB 仿真	204
第 4 章 控制系统设计	113	6.1 概述	204
4.1 引言	113	6.1.1 电力电子系统的仿真	204
4.2 控制结构设计	114	6.1.2 电力电子技术常用仿真软件	205
4.2.1 问题的提出	114	6.2 Simulink 仿真技术与模型库	207
4.2.2 基于 LCL 的 VSR 内环结构 设计	117	6.2.1 Simulink 仿真环境	208
4.2.3 基于 LC 的 VSI 内环结构 设计	121	6.2.2 Simulink 模型库简介	222
4.3 调节器结构设计	124	6.2.3 Power System 模型库简介	223
4.3.1 问题提出	125	6.3 电力电子典型器件的 MATLAB 仿真	224
4.3.2 同步坐标系下的调节器结构 设计	126	6.3.1 电力二极管的仿真	225
4.3.3 静止坐标系下的调节器结构 设计	132	6.3.2 晶闸管的仿真	227
4.3.4 不同坐标系下调节器结构比较	134	6.3.3 门极可关断晶闸管的仿真	230
4.4 控制系统调节器参数设计	136	6.3.4 绝缘栅双极型晶体管的仿真	232
4.4.1 基于连续域的调节器参数 设计	137	6.4 电力电子典型电路的 MATLAB 仿真	235
4.4.2 基于离散域的调节器参数 设计	143	6.4.1 直流斩波电路的仿真	235
参考文献	158	6.4.2 三相逆变电路的仿真	238
第 5 章 空间矢量脉宽调制技术	160	6.4.3 三相桥式整流电路的仿真	242
5.1 二维空间矢量脉宽调制技术	160	6.4.4 交流调压电路的仿真	246
5.1.1 三相 VSR 空间电压矢量分布	163	6.5 电力电子典型系统的仿真	247
5.1.2 空间电压矢量的合成	164		

6.5.1	引言	247	8.2.1	磁性材料的特性	298
6.5.2	直流斩波电路控制系统的仿真	248	8.2.2	磁性材料的工作状态	299
6.5.3	三相逆变电路控制系统的仿真	251	8.2.3	几种常用磁性材料	299
	参考文献	260	8.2.4	电力电子装置中的常用电磁器件	300
第7章	软开关变换器	261	8.3	电磁器件的设计	304
7.1	概述	261	8.3.1	变压器设计	304
7.1.1	功率器件的开关过程	262	8.3.2	电抗器设计	306
7.1.2	软开关的分类及特征	262	8.3.3	高频电磁器件的设计举例	308
7.2	零转换 PWM 变换器	266	8.4	磁性器件的测试	311
7.2.1	基本的零电压转换 PWM 变换器	266	8.4.1	变压比测量	311
7.2.2	改进的零电压转换 PWM 变换器	267	8.4.2	极性测试	312
7.2.3	基本的零电流转换 PWM 变换器	269	8.4.3	输入阻抗测试	312
7.2.4	改进的零电流转换 PWM 变换器	271	8.4.4	电感与漏感测试	313
7.2.5	零转换 PWM 变换器的应用	273	8.4.5	变压器绝缘电阻和抗电强度测试	317
7.3	移相控制 ZVS PWM 全桥变换器	276	8.4.6	温升测试方法	317
7.3.1	移相控制 ZVS PWM 全桥变换器工作原理	276	8.5	电力电子装置中的电磁兼容问题	318
7.3.2	移相控制 ZVS PWM 全桥变换器软开关实现条件	278	8.5.1	电力电子技术中电磁干扰问题	318
7.3.3	移相控制 ZVS PWM 全桥变换器的占空比丢失	279	8.5.2	电力电子技术中电磁干扰与电磁兼容标准	319
7.3.4	移相控制 ZVS PWM 全桥变换器的优缺点分析	280	8.5.3	电力电子装置中的电磁干扰源	320
7.4	移相控制 ZVZCS PWM 全桥变换器	280	8.5.4	电力电子技术中的电磁兼容设计	325
7.4.1	变压器一次侧加饱和电感和隔直电容的 ZVZCS 变换器	281		参考文献	334
7.4.2	二次侧有源钳位 ZVZCS 全桥变换器	285	第9章	电力电子器件的热设计	336
7.4.3	其他典型 ZVZCS 全桥变换器	289	9.1	稳态热阻与瞬态热阻	336
	参考文献	295	9.1.1	稳态热阻	336
第8章	电力电子装置中的电磁器件与电磁兼容性	297	9.1.2	瞬态热阻	339
8.1	概述	297	9.2	耗散功率与结温	340
8.2	电磁器件的特点和基本概念	298	9.2.1	开关器件的功率损耗	340
			9.2.2	VVVF 变频器中功率器件耗散功率的分析	343
			9.2.3	结温	344
			9.3	散热器常用的冷却方式及特点	346
				参考文献	351
			附录		352

第 1 章 电力电子半导体器件

[学习指导]

电力电子半导体器件是电力电子技术发展的基础，电力电子技术的跨越式发展无一不来自于电力电子半导体器件的率先发展。四十年来，电力电子半导体器件经历了从最早的以晶闸管为代表的整流器阶段到以门极关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)为代表的逆变器时代；而从 20 世纪 90 年代起，绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和场效应晶体管(MOSFET)开始迅速发展，使得电力电子装置的应用范围迅速扩大。如今，电力电子半导体技术依然在高速发展，一方面是传统器件结构的不断改进促进了各种器件应用的扩展与优化，如“超级结”结构极大地降低了 MOSFET 器件的导通电阻；集成门极换流晶闸管(IGCT)促进了大功率器件的更新换代，使得 GTO 在与 IGBT 的竞争中找到了新的出路。另外一方面，宽禁带半导体材料的使用，使得电力电子半导体器件突破了硅材料的瓶颈，其必将成为 21 世纪电力电子技术的强大驱动力。

本章在简单回顾电力电子半导体器件基础知识的基础上，简要介绍新型的电力电子半导体器件应用知识，重点介绍新型功率器件(如 MOSFET、新型 IGBT, 以及由 GTO 发展而来的 IGCT 等)、半导体器件材料和电力电子集成技术的最新发展，从而使读者对当今电力电子器件的技术与发展有一些初步的了解和认识，并在学习和工作中能对器件的选择和应用有一个良好的概念和基础。

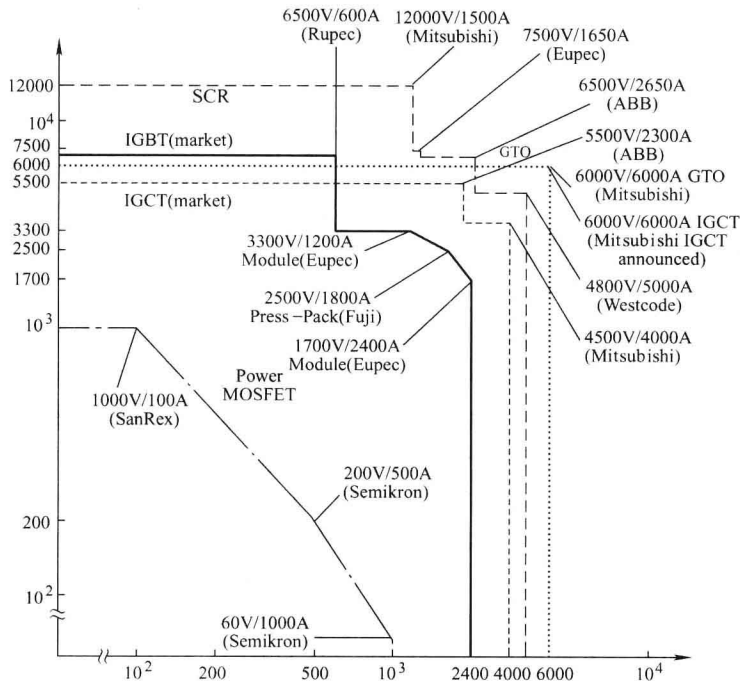
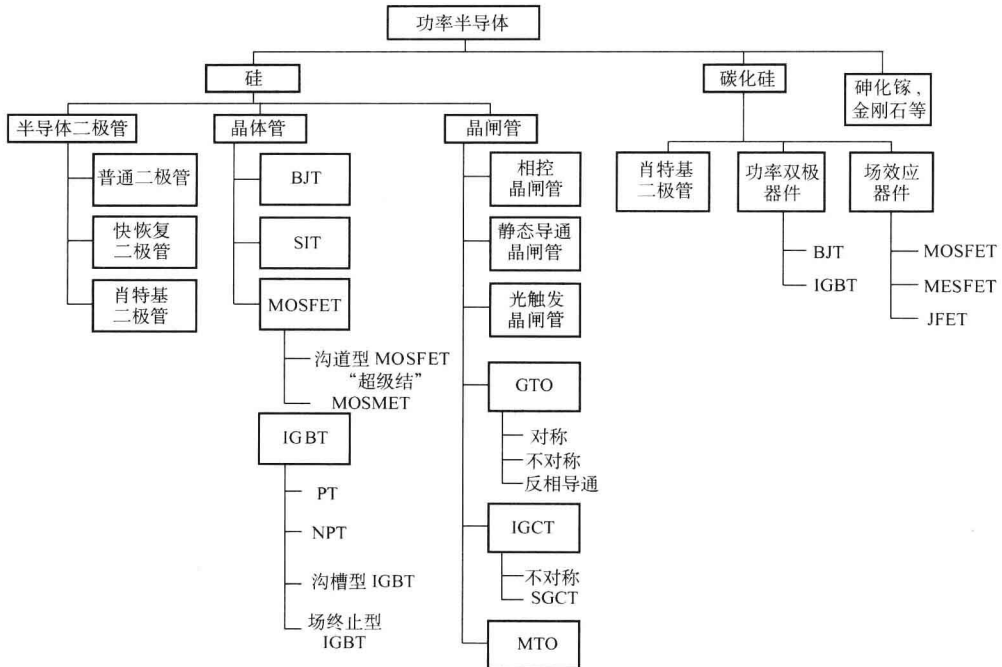
学习本章需要对半导体知识有简单的了解，对本科教材《电力电子技术》中介绍的电力电子器件的工作原理和基本结构有一定的基本认识。

1.1 电力电子器件发展概述

自从 1957 年底第一代晶闸管(SCR)面世以来，电力电子半导体器件发展迅猛。直到 1970 年，普通晶闸管开始在工业应用中大量用于电力控制。1970 年以后，各种类型的电力电子半导体器件相继出现并逐步商业化。图 1-1 给出了由硅或碳化硅材料制成的典型的功率半导体器件。其中，碳化硅器件正在迅速发展，而绝大部分实际工业应用的器件都是用硅材料制作的。这些器件大致可以分为三类：功率二极管、晶闸管和晶体管。随着电力电子器件应用范围的扩大和应用场合要求的提升，对器件的发展要求也越来越提高，主要体现在：①更高的功率容量；②更低的开关损耗；③更高的开关频率；④更紧凑的封装体积；⑤集成以及模块化设计。当今在电力电子器件上应用的新技术大多都是围绕这几点发展方向来展开的，图 1-2 和图 1-3 列出了各种器件主要应用场合和范围。

1.1.1 功率二极管

功率二极管的应用几乎渗透到电力电子设备的所有领域，其应用范围之大是其他半导体器件所无法比拟的，功率二极管可分为三种类型：普通型、快恢复型和肖特基型。采用新技



术的二极管功率密度大幅度提升，器件的工作结温也大大增加，这一方面来源于碳化硅等新型半导体材料的应用，另一方面则来源于通过新型半导体工艺技术。

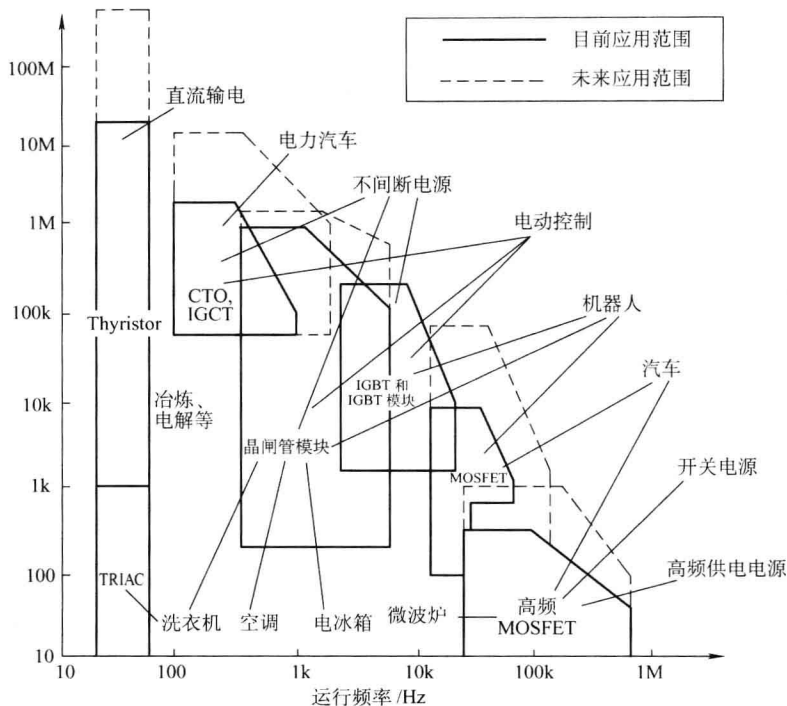


图 1-3 电力电子器件的应用与频率分布

1.1.2 晶闸管

由于器件的关断不可控，传统晶闸管及其派生器件不适合现代电力电子设备对器件的要求，但由于其无法比拟的功率容量优势和价格优势，以及自身性能的不断改善，在电解、电镀、机车牵引、柔性交直流输电等大功率应用领域，晶闸管仍是其他电力半导体器件在短时间内所无法取代的。常规应用的晶闸管大致有以下几类：①强迫换流晶闸管；②门关断晶闸管；③逆导晶闸管(RCT)；④静电感应晶闸管(SITH)；⑤光触发晶闸管(LTT)；⑥MOS控制晶闸管(MTO)；⑦集成门极换流晶闸管(IGCT)和对称门极换流晶闸管(SGCT)。

晶闸管的发展方向同样是增加单管的功率容量，同时增加对器件开关的控制度，这一点在IGCT和SGCT以及LTT的大量使用中可以很明显地体现，工业应用的普通晶闸管的额定容量可达6500V/5000A，而已见报道的晶闸管额定电压超过了10kV，以碳化硅材料制成的晶闸管甚至超过了40kV。LTT的容量等同于常规晶闸管，在传统高压直流输电中应用广泛。

IGCT和SGCT是将GTO芯片和门极驱动电路集成在一起，再与其门极驱动器在外围以低电感方式连接，结合了晶体管 and 晶闸管两种器件的优点。传统GTO器件很难关断时，必须在门极加一个约为器件额定电流1/3的驱动电流，并能在1 μ s内将阴极所有的电流抽出，这样才能确保其快速关断，可见GTO关断要求较高。而IGCT关断则是一个很快的瞬态过程，器件完全按晶体管模式关断，从而保证了完全受控的均匀关断，因此IGCT可广泛应用于大功率变频器中。

1.1.3 电力晶体管

电力晶体管有4种类型：双极结型晶体管(BJT)、功率MOSFET、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和静电感应晶体管(SIT)。其中，IGBT和功率MOSFET是最为广泛应用的电力电子器件，大到直流输电，小到生活中的各种家用电器，到处都可以见到这两种器件的应用。由于这两种器件主要应用于中小功率场合，相对于功率容量的提升，各器件公司主要将发展和竞争重点放在损耗的降低上，纷纷推出新一代的IGBT和MOSFET器件。其中，较为典型的技术优化为沟槽型门极结构和垂直导电技术。另外在IGBT方面有场终止技术、空穴阻抗技术等，而功率MOSFET方面的典型代表则有“超级结”技术。

1.2 功率MOSFET

功率MOSFET出现在20世纪70年代晚期，它的出现主要来源于70年代中期MOS技术的发展，不同于传统的双极结型晶体管(BJT)，MOSFET属于场效应晶体管器件，是一种单极型电压控制型器件。在导通状态下，仅有多数载流子工作，所以与双极型电流控制型器件相比，所需的驱动功率非常小，并且显著减少了开关时间，因而很容易达到100kHz以上的开关频率。功率MOSFET是低压范围内(如小于200V)最好的开关器件，但随着电压的升高，由于其导通电阻随耐压的2.5次方急剧上升，因此损耗也相应增加，这给高压功率MOSFET的应用带来很大困难。

1.2.1 沟槽型MOSFET

沟槽技术最早见于功率放大器和电能转换装置的功率MOSFET，其在传统的MOS器件基础上主要进行了三项改进：①垂直安装漏极，以实现垂直导电。主要是将在传统MOS结构中源极和栅极同时水平安装在硅片顶部的漏极改装在硅片的底面上，这样充分利用了硅片面积，基本上实现了垂直传导漏源电流，消除了导通电阻中的JFET区阻抗部分，减小了沟槽阻抗 R_{CH} ，为获得大电流容量提供了前提条件；②借鉴GTR设置了高电阻率的 N^- 型漂移区，不仅提高了器件的耐压容量，而且降低了结电容，并使沟道长度稳定；③采用双重扩散技术代替光刻工艺控制沟道长度，可以实现精确的短沟道，在降低沟道电阻值的同时还提高了器件工作速度，并使器件具有良好的线性输出特性。

图1-4a和式(1-1)表示了MOSFET导通电阻的主要组成部分以及分布情况：图1-4b则显示了基于沟槽门极概念的垂直导电结构MOSFET单元模型，可以看出：一方面沟槽门极元胞结构对于降低导通电阻 R_{on} 中的JFET区阻抗和沟槽阻抗部分十分有效；另一方面，MOSFET的承受电压的增加需要厚的 N 层，而这会导致导通电阻中的 R_d 部分增加，而高电阻率的 N^- 型漂移区可以减少实际需要的 N 层宽度。基于少于 $0.2\mu\text{m}$ 的优化沟槽门极工艺被广泛应用于100V以下等级的MOSFET，其通态导通电阻已经非常接近理论上的硅器件极限值。通态导通电阻 R_{ON} 可表示为：

$$R_{ON} = R_{CS} + R_{N^+} + R_{CH} + R_A + R_J + R_D + R_{N^+} + R_{CD} \quad (1-1)$$

式中， R_{CS} 为源极阻抗； R_{CH} 为沟槽阻抗； R_J 为JFET区阻抗； R_{N^+} 为 N^+ 衬底阻抗； R_A 为缓冲区阻抗； R_D 为 N^- 漂移区阻抗； R_{CD} 为漏极阻抗。

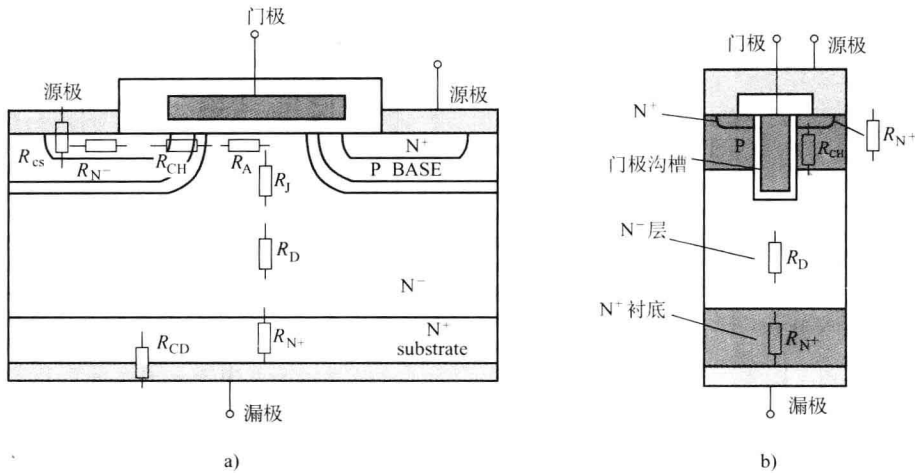


图 1-4 沟槽型 MOSFET 的剖面结构及其电阻分布示意

不过沟槽门极结构也有一些相伴而生的缺点，如：①沟道宽度过大，通常会引起结电容的增大，从而影响开关速度；②可能会引起短路电流过大；③技术上难度较大，会降低成品率。

另外，沟槽技术不仅适用于 MOSFET，同样也适用于 IGBT。

1.2.2 “超级结”结构

正如上面所说，在功率半导体器件发展的历史上最重要的问题就是寻求如何通过新的器件结构和半导体材料来改善耐受电压和导通压降之间的矛盾。功率 MOSFET 作为单极型器件，需要在耐受电压和导通电阻之间做一个综合考虑，同时在不降低器件性能的前提下尽量减小器件尺寸。以往，为了使器件维持耐受电压的同时降低导通电阻，可采用上述的沟槽技术。沟槽技术主要是在器件工作的漂移区中形成器件通态时的载流子积累，并通过积累载流子形成的导电通道来降低导通电阻，但随着技术的发展，该方法已经达到硅器件的理论极限。为此，一种被称为“超级结”结构的三维结构概念被用于 MOSFET 制造中，并且在解决导通电阻和耐受电压矛盾方面获得了显著的效果。这种结构来源于我国陈星弼院士的中美发明专利，其主要思想是通过尽量提高功率器件漂移区浓度，即通过在器件不同维度上引入新的电场来达到对漂移区载流子的有效中和以获得一定的击穿电压。图 1-5 表示了 MOSFET 中“超级结”结构(见图 1-5b、d)和常规 PN 结结构(见图 1-5a、c)的区别。近几年，“超级结”结构已经被广泛应用于 MOS 门极驱动器件中。

“超级结”结构的主要特点是用 N 区与 P 区相互交替的形式代替了传统上必须承担击穿电压的 N^- 漂移区，而这种区域的交替只具有水平方向的电场作用，所以并不影响垂直方向的电场。其剖面结构如图 1-5b 所示，当“超级结”结构的 MOSFET 处于阻断状态时，由 N^- 漂移区和柱状 P 型区形成的 PN 结边缘的空间电荷区不断扩散，最终导致整个漂移区被完全耗尽，电势分布从源端到漏端线性增加，电场分布趋于理想的均匀分布。这样，阻断电压不仅建立起了纵向电场，而且同样也建立起了横向电场，即在实现更高阻断电压的同时，无需降低漂移区的掺杂浓度，只需要增加 N^- 漂移区的厚度和 P 区的厚度，以满足击穿电压的要求，因此“超级结”结构的 MOSFET 通态电阻与阻断电压之间接近线性关系。当“超级结”结构的 MOSFET 处于导通状态时，如图 1-5d 所示，电子从源极出发然后经过 N^- 漂移

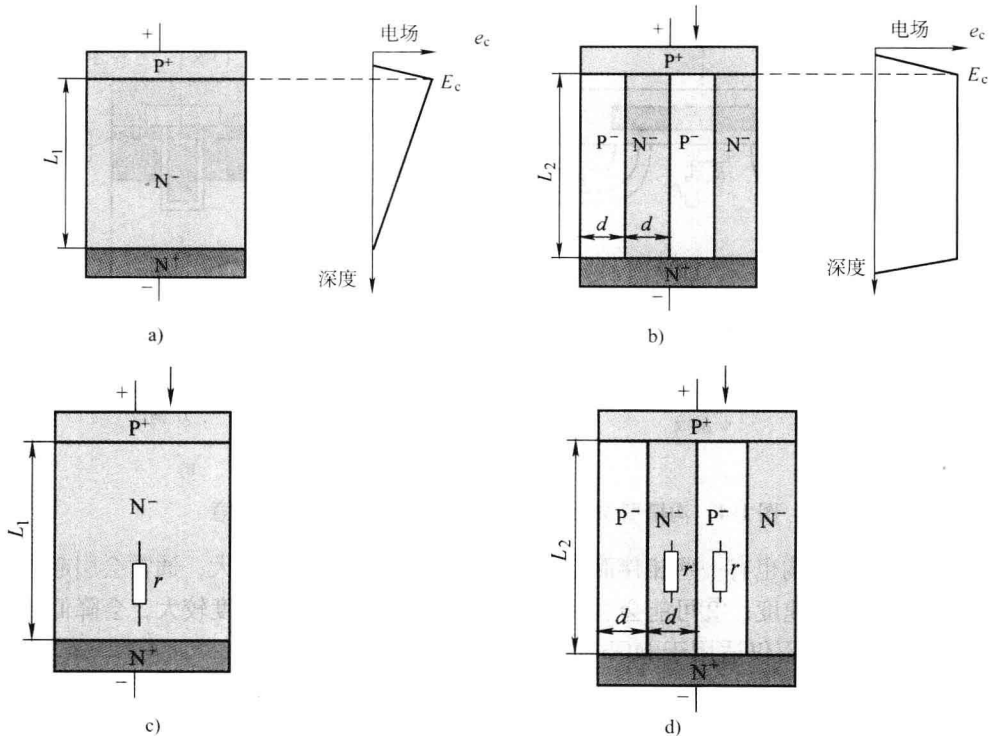


图 1-5 MOSFET 的结构原理图

a)、c) 常规 PN 结结构 b)、d) “超级结”结构

区到达漏极，由于 N^- 漂移区具有较高的掺杂浓度，因此导通电阻大大减小。

理想的“超级结”结构特性虽好，但工艺上实现还比较困难，必须通过多次外延或刻蚀加离子注入的方法来实现，为了规避这些技术难题，又提出一些新的方案，例如将“超级结”结构与垂直导电双扩散 MOS 结构 (VDMOS) 结合的“半超级结”结构，这实际上是通过 MOS 系统来代替 PN 结提供额外电场的类“超级结”结构，即用蚀刻氧化形成一定厚度的边氧并用多晶硅或高浓度的 N^+ 或 P^+ 提供电极，从而和“超级结”一样能够提供新的电场来进行补偿，这种工艺相对来说简单一些。这些新的方案原理基本都与“超级结”结构类似，一般是在性能和工艺难度上的折中选择。

1.2.3 COOLMOS

COOLMOS 为英飞凌公司推出的采用“超级结”结构的新一代 MOSFET，已广泛应用于各种中小功率电力电子装置中，COOLMOS 相对于传统 MOSFET 所体现的优势在于：

1) 导通电阻的降低。英飞凌公司推出的 COOLMOS，耐压为 600V 和 800V 的器件与传统 MOSFET 相比，相同的管芯面积条件下，导通电阻分别下降为传统 MOSFET 的 $1/5$ 和 $1/10$ ；相同的额定电流条件下，导通电阻分别下降为传统 MOSFET 的 $1/2 \sim 1/3$ 。导通电阻的降低是 COOLMOS 相对于传统 MOSFET 的最大优势，也是英飞凌公司将其命名为 COOLMOS 的主要原因。

2) 封装的减小。相同额定电流的 COOLMOS 的管芯减小为传统 MOSFET 的 $1/3 \sim 1/4$ ，由此 COOLMOS 的封装也可以大大减小。