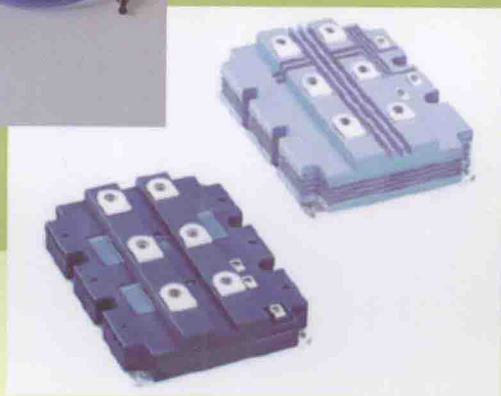


功率半导体器件 及其仿真技术

GONGLÜ BANDAOTI QIJIAN JIQI FANGZHEN JISHU

陆晓东 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

功率半导体器件及其仿真技术

陆晓东 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书是在作者多年从事功率半导体器件工艺和产品开发的基础上完成的。全书共分为五部分,即功率半导体器件的基础、工作原理、加工工艺、设计与热设计,其中前两部分是功率半导体器件应用基础,重点给出了功率半导体器件的发展历史、目前的制作水平、未来发展趋势和几种常见功率器件的工作原理;后三部分主要给出了作者在工作中所使用的工艺和产品设计过程中运用的基本理论和基本技术,特别是在设计部分,作者给出了自己实际工作过程中编制计算程序的源代码、晶闸管的设计流程和经验参数计算等。

本书可为从事功率器件的研究人员提供十分有价值的设计参考。

图书在版编目(CIP)数据

功率半导体器件及其仿真技术 / 陆晓东著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-5024-7127-9

I. ①功… II. ①陆… III. ①功率半导体器件
IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 316569 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 陈慰萍 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7127-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016年1月第1版,2016年1月第1次印刷

169mm×239mm; 10.25印张; 199千字; 155页

48.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

目前，电力电子应用领域十分广泛，如用电领域中的电力电子技术有电动机的优化运行、高能量密度的电源应用；信息领域中电力电子技术为信息技术提供先进的电源和运动控制系统，日益成为信息产品中不可缺少的一部分；发电领域中的电力电子技术有发电机的直流励磁、水轮发电机的变频励磁、环保型能源发电；储能领域中的电力电子技术有蓄电池与电容器组储能、抽水储能发电、超导线圈的磁场储能；输电领域中的电力电子技术有动态无功功率补偿（SVC）技术、高压直流输电（HVDC）技术、消除谐波改善电网供电品质等。

电力电子技术是利用功率半导体器件对电能进行变换和控制的技术，其最大的特点在于实现强电与弱电相结合，以弱电控制强电，用以实现电能的转换、控制、分配和应用的最优化、高效率、智能化。在未来电力能源使用过程中，几乎所有的电能都需要经过电力电子设备的转换，因此未来电力电子技术将发挥越来越重要的作用。

功率半导体器件是构成各种电力电子设备的核心，对提高整机装置的各项技术指标和性能起着至关重要的作用。功率半导体器件的一般特征为：

（1）处理电功率的能力小至毫瓦级，大至兆瓦级，大多都远大于处理信息的电子器件。

（2）电力电子器件一般都工作在开关状态，导通时，接近于短路，管压降接近于零，而电流由外电路决定；阻断时，阻抗很大，接近于断路，电流几乎为零。开关特性是电力电子器件特性很重要的特性，有些时候甚至上升为第一位的重要特性。

（3）电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。

（4）电力电子器件在工作时一般都要安装散热器。

目前，功率半导体器件仍以硅材料为主。电力电子技术的实现和

不断发展，离不开各类功率半导体器件性能的稳定提高和产品类型的不断创新，所以功率半导体器件制造产业是国民经济发展中基础性的支柱型产业之一。

目前，功率半导体器件正由半控型、全控型器件快速进入全新的智能型时代，其发展脉络表现出的特点是：一方面原有各新型功率半导体器件额定参数不断提高；另一方面电力电子技术与微电子技术进一步结合，使功率半导体器件朝着大容量、智能化方向迅速发展。其发展方向主要包括：

- (1) 现有器件扩大容量、提高性能。
- (2) 开发新型的功率半导体器件。
- (3) 提高芯片及模块的集成度，简化电路结构设计。
- (4) 寻找新材料，制作新型功率半导体器件。

在功率半导体器件加工和设计部分，本书重点介绍了整流管、晶闸管的基本加工工艺的原理、器件特性设计的理论依据。最后，本书介绍了利用流行的晶闸管经验公式的设计方法并结合计算机的超运算能力开发的晶闸管结构设计程序。该程序实现了两个计算功能模块：

(1) 参数复核功能模块：该模块主要实现了在结构参数给定的情况下，计算出相关电参数的理论值，这种功能可为产品结构参数调整提供十分有益的帮助。

(2) 结构设计功能模块：该模块可通过设计者给出的电参数，计算出晶闸管的结构参数，为制作性能良好的晶闸管提供理论设计依据。

除上述两个基本功能外，本书给出的 Matlab 程序已实现界面友好的应用程序要求，操作者可很容易地通过程序提示，完成晶闸管生产过程中的参数复核运算和生产前的结构参数优化设计过程。

作 者

2015 年 10 月

目 录

1 功率半导体器件基础	1
1.1 电力电子技术概述	1
1.1.1 电力电子技术发展的背景	1
1.1.2 电力电子技术与其他学科的关系	1
1.1.3 电力电子技术的发展	3
1.1.4 电力电子技术的应用	4
1.2 功率半导体器件概述	5
1.2.1 半导体器件的分类	5
1.2.2 功率半导体器件命名规则	6
1.2.3 功率半导体器件的发展	8
1.3 功率半导体器件的研制水平及主要用途	11
1.3.1 电力整流管	11
1.3.2 普通晶闸管及其派生器件	12
1.3.3 全控型功率半导体器件	14
1.3.4 复合型功率半导体器件	16
1.4 功率半导体器件模块	22
1.4.1 晶闸管和整流二极管传统模块	23
1.4.2 晶闸管智能模块	24
1.4.3 IGBT 模块	25
1.4.4 智能功率模块	27
1.4.5 用户专用电力模块	28
1.4.6 集成电力电子模块	28
1.5 功率半导体器件展望	29
1.5.1 功率半导体器件功率变换能力的不断提升	31
1.5.2 新材料功率半导体器件	32
1.5.3 关于现代功率半导体器件发展趋势的几点看法	38
2 功率半导体器件工作原理、特性及主要参数	40
2.1 功率半导体器件的工作状态	40

2.1.1	功率半导体器件的工作特征	40
2.1.2	功率半导体器件应用系统的组成	41
2.2	功率二极管	42
2.2.1	功率二极管的工作原理	42
2.2.2	功率二极管的静态和动态特性	44
2.2.3	功率二极管的主要参数	44
2.2.4	功率二极管的类型	45
2.3	晶闸管	46
2.3.1	晶闸管的结构特点	46
2.3.2	晶闸管的工作原理	47
2.3.3	晶闸管的基本特性	50
2.3.4	晶闸管的基本参数	62
2.4	功率场效应晶体管	64
2.4.1	结构分类	64
2.4.2	工作机理	66
2.4.3	特性分析	67
2.5	IGBT 的结构及特性	73
2.5.1	IGBT 的基本结构	73
2.5.2	IGBT 的工作原理	73
2.5.3	IGBT 的工作特性	76
3	功率半导体器件加工工艺	79
3.1	功率半导体器件加工流程	79
3.1.1	整流二极管基本工艺流程	79
3.1.2	晶闸管基本工艺流程	79
3.1.3	烧、蒸、坚工序流程	82
3.1.4	硅片清洗处理	82
3.1.5	各工序检查标准	84
3.2	扩散工序	87
3.2.1	一维 Fick 扩散方程	87
3.2.2	恒定扩散系数	88
3.2.3	扩散系数与温度的关系	89
3.2.4	扩散参数	89
3.3	氧化工艺	91
3.3.1	热氧化原理	91

3.3.2 氧化层的作用	92
3.4 欧姆电极制备	98
3.4.1 铝硅、铝片处理	99
3.4.2 装模	99
3.4.3 不同烧结效果产生的原因	100
3.5 台面工艺	102
3.5.1 负角结构原理	102
3.5.2 台面腐蚀	103
3.5.3 台面保护	104
4 功率半导体器件设计	105
4.1 晶闸管结构设计	105
4.1.1 晶闸管的基本结构	105
4.1.2 晶闸管结构参数和电参数间的制约关系	106
4.1.3 程序设计的部分重要公式	107
4.2 晶闸管设计软件的界面形式	110
4.2.1 主界面形式	111
4.2.2 参数验算功能模块	111
4.2.3 结构设计功能模块	114
5 功率半导体器件热设计	119
5.1 功率半导体器件散热方法	119
5.1.1 自然冷却方法	120
5.1.2 强迫空气冷却方法	120
5.1.3 液体冷却方法	120
5.2 大功率半导体器件用散热器风冷热阻计算	121
5.2.1 传热的基本原理和公式	121
5.2.2 求解散热器热阻和绘制热阻曲线的软件	126
5.2.3 讨论	132
5.3 散热器的选择	132
附录 晶闸管设计程序	134
参考文献	154

1 功率半导体器件基础

1.1 电力电子技术概述

1.1.1 电力电子技术发展的背景

近年来，世界范围内的能源短缺和环境污染问题均日益突出。一方面，为了实现经济社会的可持续发展，各国政府都纷纷加大了对新型清洁能源领域的政策引导力度，并希望借此推进新能源的快速发展，使其最终成为人类未来利用的主要能源。另一方面，如何有效利用能源，提升现有能源的利用效率，也是世界各国解决能源短缺和环境污染问题必须长期坚持的基本能源政策。

在人类可直接使用的二次能源中，电能是应用最广泛的能源，也是消耗最大的能源。对一个国家的经济和生活质量而言，一次能源（如煤、石油、天然气和太阳能、风能等）转换为电能的比例和效率越高，表明该国的生产力越先进，人民的生活水平越高。正因为如此，提供高效清洁的电能和提高能源利用效率（包括能源转换效率和终端消费效率），就成为电能利用的最重要课题之一。

电力电子技术又称功率电子技术，是利用功率半导体器件对电能进行变换和控制的技术，其最大的特点在于实现强电与弱电相结合，以弱电控制强电，用以实现电能的转换、控制、分配和应用的最优化、高效率、智能化。电能从电厂产生、经线路输送、最后到终端用户的整个过程，涉及电能的产生、存储、传输、分配及高效利用等环节，都需要充分发挥电力电子技术的重要作用。目前，在人类利用的总能源中，电能约占40%，如果能使用有效的电力电子技术对电能进行变换，人类至少可节省约1/3的能源消耗。正因为如此，现代电力电子技术已成为改造传统产业（电力、机械、矿冶、交通、化工、轻纺等）和实现新建高技术产业（航天、激光、通信、机器人等）的基本技术，同时也是实现节能、降耗、减排的基本技术。据估计，在发达国家，用户最终使用的电能中，有60%以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。在未来电力能源使用过程中，几乎所有的电能都需要经过电力电子设备的转换，因此未来电力电子技术将发挥越来越重要的作用。

1.1.2 电力电子技术与其他学科的关系

电力电子技术包括功率半导体器件、功率变换技术及控制技术等几个方面，

是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科。随着科学技术的发展,电力电子技术由于和现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关,已逐步发展成为一门多学科相互渗透的综合性技术学科。

在实际应用中,电力电子装置一般是由主电路、控制电路、检测电路、驱动电路、保护电路等组成,如图 1-1 所示。检测电路将检测的主电路信号送入控制电路,然后控制电路根据这些信号并按照系统工作要求形成电力电子器件的控制信号,最后控制信号通过驱动电路来控制主电路中电力电子器件的导通或关断,从而完成整个系统的功能。在主电路和控制电路中附加一些保护电路,可以保证系统正常可靠运行。

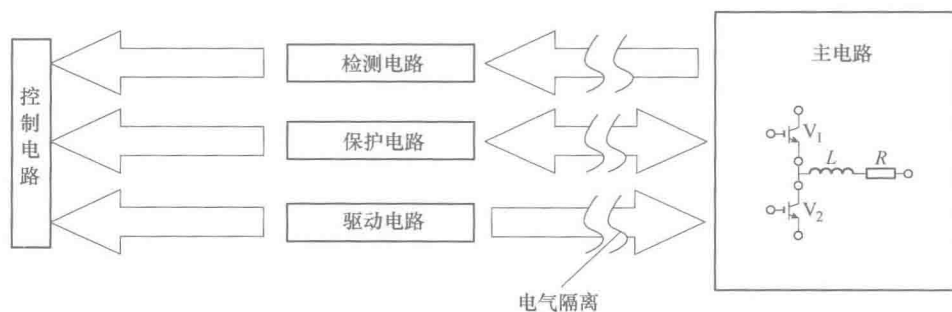


图 1-1 电力电子器件在实际应用中的系统组成

1974 年,美国的 W. Newell 用倒三角形对电力电子学进行了描述,如图 1-2 所示。他的这一观点已被全世界普遍接受。电力电子学中使用的电子技术与信息电子技术不同。信息电子技术包括数字电路和模拟电路,主要用于信息处理,器

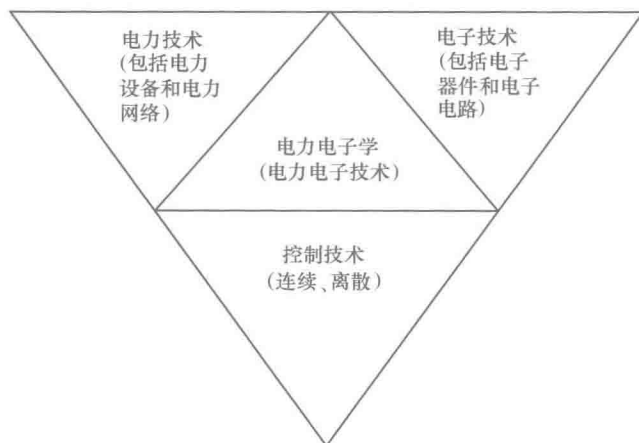


图 1-2 电力电子技术描述

件可工作在开关状态和放大状态；而电力电子技术主要用途是电力变换和控制，且其器件一般只工作在开关状态。但二者间又存在着十分紧密的关系：

- (1) 二者的器件材料和制作工艺基本相同；
- (2) 二者的理论基础、分析方法、分析软件基本相同；
- (3) 二者都已形成了以器件为基础，以应用为核心的发展过程。

电力电子学与电气工程关系密切，其研究对象广泛应用于高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电解、电镀、电加热、高性能交直流电源等电气工程领域。由于电力电子技术是弱电控制强电的技术，是弱电和强电的接口，因此电力电子学与控制技术也存在十分密切的关系，表现为：控制技术是弱电和强电接口的强有力纽带，而电力电子装置是控制理论实践的基础和重要的支撑平台。

1.1.3 电力电子技术的发展

电力电子技术的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管为标志，之后逐渐从以低频技术处理问题为传统的电力电子技术，向以高频技术处理问题为主的现代电力电子技术方向发展。电力电子技术的发展主要分为两个阶段：

(1) 传统电力电子技术（1957 ~ 1980 年）。该阶段的典型产品为晶闸管及其派生器件。此时，半导体技术逐渐形成微电子学和电力电子技术两大分支。微电子学是以晶体管集成电路为核心的信息处理技术，其特点为集成度越来越高，规模越来越大，功能越来越全。电力电子技术是以晶闸管为核心的电能处理技术，其特点为晶闸管的派生器件越来越多，功率越来越大，性能越来越好。典型电路包括不可控整流电路、相控整流电路、逆变电路以及交流变换电路。

(2) 现代电力电子技术（1980 年 ~ 现在）。该阶段的典型产品为功率场效应管（MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等。与传统技术相比，现代电力电子技术具有集成化、高频化、全控化、数字化等特点。所谓电力电子系统的集成就是将功率器件、电路元件、控制器、传感器及动作开关等集成为一个完整的智能电力电子系统。电力电子系统级的集成目标是建立系列电力电子集成标准模块，形成一个高度集成的、能完成特定功能的、标准的电能处理单位。所谓高频化是指功率半导体器件的开关频率不断提高，如传统的 GTO（可关断晶闸管）的工作频率已达 1 ~ 2kHz，电力二极管的工作频率已达 2 ~ 5kHz，MOSFET 的工作频率已达数百 kHz。所谓全控化是指电力电子装置避免了传统器件关断时所需要的强迫换流电路，而逐渐转变为全弱电控制，控制技术全数字化。所谓多功能化是指传统的电力电子电路只有开关功能，多用于整流，而现代电力电子电路不仅具有开关功能，还可以实现放大、调制、振荡、逻辑运算等功能。

1.1.4 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业，也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等，在照明、空调等家用电器及其他领域中也有广泛的应用。

(1) 在一般工业领域中的应用。大量应用的各种交直流电动机，都是用电力电子装置进行调速的。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等，近年来也采用了变频装置，以达到节能的目的。有些并不特别要求调速的电动机为了避免启动时电流冲击而采用了软启动装置，这种软启动装置也是电力电子装置。电化学、电解铝、电解食盐水、电镀装置等行业所用的大容量直流电源和整流电源等均为电力电子装置。电力电子技术还广泛应用于冶金工业中的高频或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等场合。

(2) 在交通运输领域的应用。在交通运输领域的应用如电气化铁道和铁道车辆中广泛采用电力电子技术（如电气机车中的直流机车中采用的整流装置，交流机车中采用的变频装置）、铁道车辆中广泛使用的直流斩波器。电动汽车的电动机依靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制，其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电动机，它们也要靠变频器，斩波器驱动并控制。在未来的磁悬浮列车中，电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电动机传动外，车辆中的各种辅助电源也离不开电力电子技术，飞机、船舶和电梯等也都离不开电力电子技术。

(3) 在电力系统领域的应用。长距离、大容量的直流输电在输电领域有很大的优势，其送电端的整流阀和受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置，而轻型直流输电则主要采用全控型的 IGBT 器件。近年发展起来的柔性交流输电（FACTS）也是依靠电力电子装置才得以实现的。晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）、静止无功发生器（SVG）、有源电力滤波器（APF）等电力电子装置大量用于电力系统的无功补偿或谐波抑制。在配电网系统，电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等，以进行电能质量的控制，改善供电质量。在变电所中，给操作系统提供可靠的交直流操作电源、给蓄电池充电等都需要电力电子装置。

(4) 在电子装置用电源领域的应用。各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前用晶闸管整流电源，现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在大型计算机等场合，常常需要不间断电源（Uninterruptible Power Supply, UPS）供电，不间断电源实际就是典型的电力电子装置。

(5) 在家用电器领域的应用。电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源,正在逐步取代传统的白炽灯和日光灯。空调、电视机、音响设备、家用计算机以及不少洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。

(6) 在其他领域中的应用。航天飞行器中的各种电子仪器需要电源,载人航天器也离不开各种电源,这些都需采用电力电子技术。抽水储能发电站的大型电动机需要用电力电子技术来启动和调速。超导储能是未来的一种储能方式,它需要强大的直流电源供电,这也离不开电力电子技术。新能源、可再生能源发电,如风力发电、太阳能发电,均需要用电力电子技术来缓冲能量和改善电能质量,当需要和电力系统联网时,更离不开电力电子技术。核聚变反应堆在产生强大磁场和注入能量时,需要大容量的脉冲电源,这种电源就是电力电子装置。科学实验或某些特殊场合,常常需要一些特种电源,这也是电力电子技术的用武之地。

1.2 功率半导体器件概述

电力电子技术的发展离不开功率半导体器件的突破和创新。尽管功率半导体器件的总价一般只占电力电子设备总价的20%~30%,但它是构成各种电力电子设备的核心,对提高整机装置的各项技术指标和性能起着至关重要的作用。所谓“一代功率半导体器件带动一代电力电子技术”,电力电子技术与功率半导体器件的发展始终是相辅相成的。电力电子技术的实现和不断发展,离不开各类功率半导体器件性能的稳定提高和产品类型的不断创新,所以功率半导体器件制造产业是国民经济发展中基础性的支柱型产业之一。

1.2.1 半导体器件的分类

从本质上讲,功率半导体器件属于半导体器件。目前,半导体器件种类繁多,形式日趋多样。它按功率等级角度划分,包括小功率器件、中功率器件和大功率器件等;从制造材料角度划分,包括硅材料器件、锗材料器件、碳化硅器件、氮化镓器件、砷化镓器件等;从工作机理(内部载流子类型)角度划分,包括双极性器件、单极性器件和复合型器件等;从控制方式角度划分,包括不可控器件、半可控器件和全可控器件;从驱动信号性质角度划分,包括电压控制型器件和电流控制型器件两类。

国际电工委员会(IEC)根据各类器件的电流、功率大小和主要应用领域,对半导体器件进行分类,如图1-3所示。其中功率器件主要包括三类器件:整流管、绝缘栅双极晶体管和晶闸管;电信器件主要包括两类器件:信号二极管和射频二极管;功率和电信器件主要包括三类器件:光电器件、双极晶体管和场效应晶体管。功率器件的主要功能是实现电能的变换、调节或开关的执行,其特点为工作结温高、电流大、电压高、功率大和工作频率低。电信器件的主要功能是

信号的处理和电力的控制，其特点是工作结温低、电流小、电压低、功率小和工作频率高。IEC 依据电流和功率来划分功率器件和电信器件，其中电流大于 5A 的半导体器件属于功率器件，电流小于 5A 的半导体器件为电信器件；功率大于 10W 的半导体器件为功率器件，功率小于 10W 的半导体器件为电信器件。

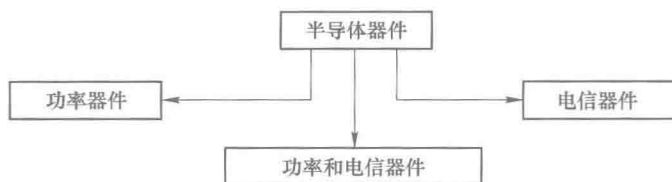


图 1-3 IEC 的半导体器件分类

功率器件的特征是所能处理的电功率大小，即其能承受电压和电流值，是其最重要的参数；为了减小本身的损耗，提高效率，一般功率器件都工作在开关状态；构成的电路（通常称为主电路）是由信息电子电路来控制，且需要驱动电路；自身的功率损耗通常远大于信息电子器件，工作时一般都需要安装散热器。

1.2.2 功率半导体器件命名规则

传统功率半导体器件主要有三种封装形式，即平板型器件、螺栓型器件和功率模块。有关功率模块将在后续章节中介绍，这里主要介绍平板型器件和螺栓型器件。

1.2.2.1 平板型器件的命名规则

一般平板型器件的名称主要利用喷码或打标的方式制作在平板型器件的陶瓷外壳上，如图 1-4 所示。

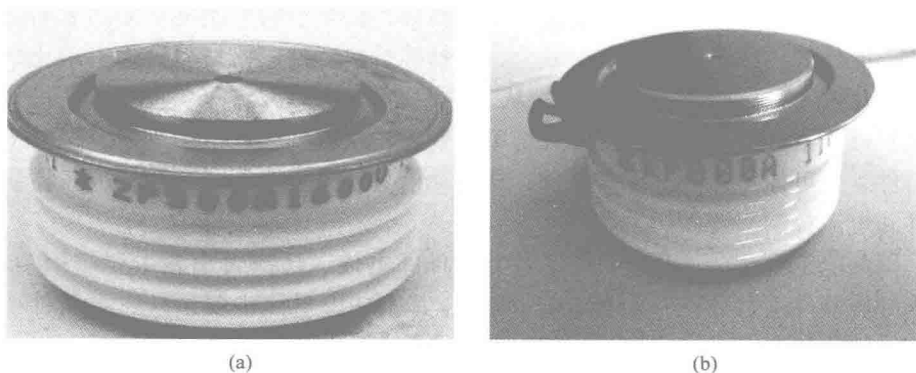


图 1-4 平板型器件外形结构

(a) 整流管；(b) 晶闸管

在平板型晶闸管命名方式中，国内厂家与国外厂家的命名方式有很大不同，而且国内不同公司的晶闸管产品的命名方式差异也很大。图 1-5 给出了北京京仪椿树整流器有限责任公司的平板型晶闸管器件的命名方式，如：在管壳上喷印的 KP 200 25 或 KP 200A 2500V 表示 200A/2500V 的普通晶闸管；ZP 200 25 或 ZP 200A 2500V 表示 200A/2500V 的普通整流管；KK 200 25 或 KK 200A 2500V 表示 200A/2500V 的快速晶闸管。在产品样本中，通常以电流值来标定平板产品的类型，如：ZP 200 表示 200A 的普通整流管。

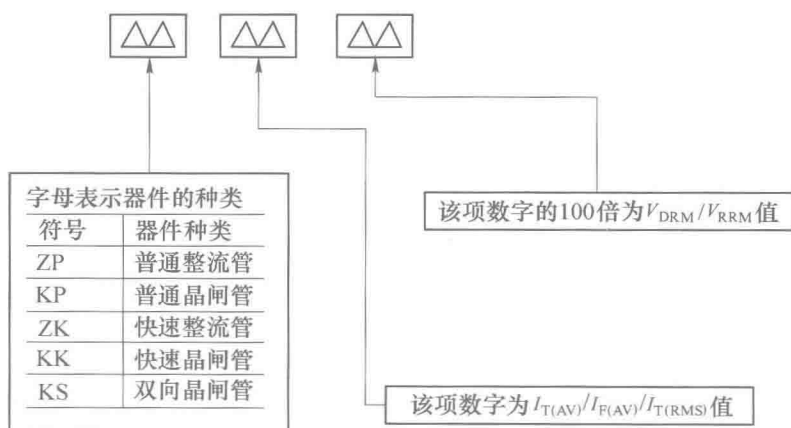


图 1-5 北京京仪椿树整流器有限责任公司平板型晶闸管器件的命名方式

1.2.2.2 螺栓型器件的命名规则

与平板型器件相同，螺栓型器件的名称也主要利用喷码或打标的方式制作在陶瓷外壳或金属外壳上，如图 1-6 所示。



图 1-6 螺栓型器件外形结构

与平板型晶闸管相同，不同公司生产的螺栓型器件的命名方式差异也很大。图 1-7 给出了北京京仪椿树整流器有限责任公司的螺栓型器件的命名方式，如：ZX 200 25 R 或 ZX 200A 2500VR 表示底座为阳极的 200A/2500V 旋转整流管；ZX 200 25 P 或 ZX 200A 2500VP 表示底座为阴极的 200A/2500V 旋转整流管。在产品样本中，通常以电流值来标定螺栓产品的类型，如：ZX 200 表示 200A 的普通整流管。

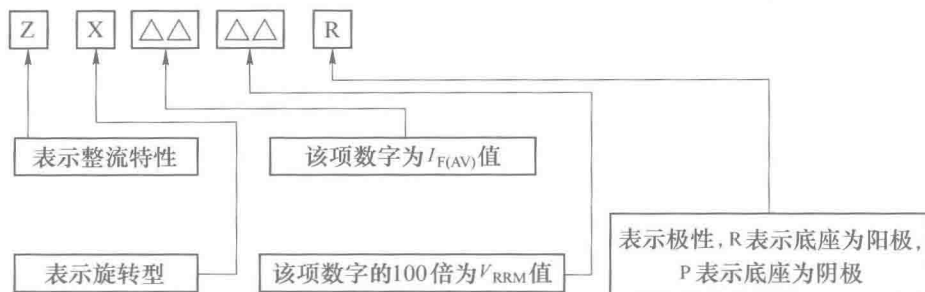


图 1-7 北京京仪椿树整流器有限责任公司螺栓型晶闸管器件的命名方式

1.2.3 功率半导体器件的发展

在晶闸管出现之前是电子管统治电子领域的时代。1904 年出现了电子管，它能在真空中对电子流进行控制，并应用于通信和无线电，从而开启了电子技术用于电力领域的先河。20 世纪 30 ~ 50 年代，水银整流器广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动，甚至用于直流输电。这一时期，各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。

1958 年美国通用电气（GE）公司研制出世界上第一个工业用普通晶闸管，标志着电力电子技术的诞生，电能的变换和控制从旋转的变流机组和静止的离子变流器进入由功率半导体器件构成的变流器时代，此后功率半导体器件获得快速发展，其发展脉络如图 1-8 所示。到 20 世纪 70 年代中期以前，晶闸管器件已经派生出了快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等多种半控型晶闸管器件，这些器件被称为第一代功率半导体器件，其芯片常见结构如图 1-9 所示。这类器件通过对门极施加控制信号能够使其导通，而一旦导通之后就不能通过门极控制使它关断，所以这种“半控特性”使得它们的应用范围受到了很大的局限。

在 20 世纪 70 年代后期，随着关键技术的突破以及需求的发展，早期的小功率、低频、半控型器件发展到了大功率、高频、全控型器件，即第二代功率半导体器件。全控型器件的特点是，通过对门极（基极或栅极）的控制既可使其开通又可使其关断，这给电能的高效转换和控制提供了极大的方便。采用全控型器件的

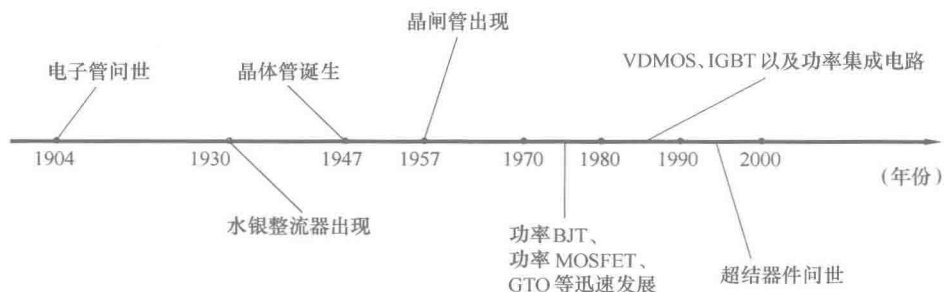


图 1-8 功率半导体器件的发展

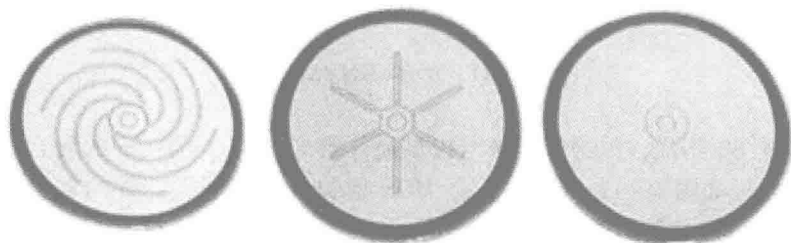


图 1-9 常见晶闸管芯片的结构

电路的主要控制方式为脉冲宽度调制 (PWM) 方式, 该方式又可称为斩波控制方式。这些器件主要有门极可关断晶闸管 (GTO, 见图 1-10a)、功率双极型晶体管 (BJT, 见图 1-10b) 和功率场效应晶体管 (Power-MOSFET, 见图 1-11)。

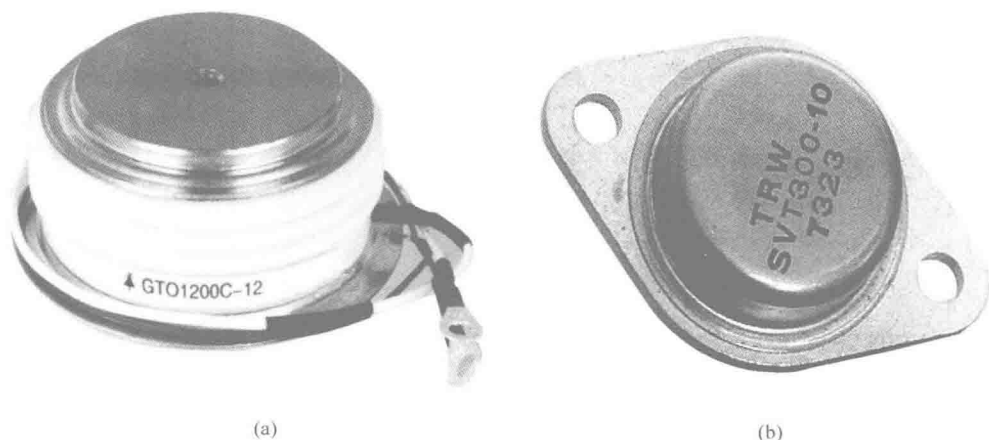


图 1-10 芯片封装结构

(a) 门极可关断晶闸管; (b) 功率双极型晶体管