

# 新型电力半导体器件 原理及应用

张为佐 编著

机械工业出版社

本书系统地介绍了三十余种新型电力半导体器件。对这些器件的发展概况、工作原理、各种特性以及实际应用作了较详细的叙述，对必要的基础理论也作了由浅入深的介绍。

本书可供从事电力电子技术研究和制造的技术人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

## 新型电力半导体器件 原理及应用

张为佐 编著

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $11 \frac{5}{8}$  · 字数 256 千字

1982年4月重庆第一版·1982年4月重庆第一次印刷

印数 0,001—5,400 · 定价 1.20 元

\*

统一书号: 15033 · 5199

## 前 言

当前，一门新的边缘学科——电力电子学已经形成。与此同时，各种新型电力半导体器件也有了迅速的发展。本书对国内外名目繁多的三十余种新型电力半导体器件作了系统的介绍。

此书是在综合大量资料的基础上并结合作者的一些研究工作编著而成的。书中力求以较清晰的物理图象来解释各种器件特性，也做了数学上的归纳。为了使读者易于理解，还由浅入深地介绍了一些必要的理论知识。

本书的第八章第四节和第九章分别由黄跃先及徐媛同志提供初稿。在编著过程中得到一机部整流器研究所各级领导及许多同志的热情关怀和支持，王元铭、陈守良、田竹标、李佑持等同志审阅了全稿，另外，何绍福、沈来仪、徐传骧、郭汉强、聂代祚、黄跃先、张明勋等同志也认真审阅过全书，并提出了宝贵意见。在此一并表示深切的谢意。

由于本书涉及的内容较广，而作者水平有限，难免有疏漏和缺点，欢迎读者批评指正。

编 者

# 目 录

第一章 概述 .....	1
第一节 电力电子学与电力半导体 .....	2
第二节 新型电力半导体器件的发展和分类 .....	5

## 组合型电力半导体器件

第二章 组合型电力半导体器件的理论基础 .....	15
第一节 各种基本单元及其组合 .....	15
第二节 短路发射极及其在组合型器件中的作用 .....	29
第三节 各种不同的门极触发机构 .....	36
第四节 换向原理 .....	39
第三章 双向晶闸管 .....	46
第一节 发展概况 .....	46
第二节 结构及触发方式 .....	48
第三节 特性及主要参数 .....	60
第四节 应用特点及其概貌 .....	70
第四章 逆导及不对称晶闸管 .....	91
第一节 发展概况 .....	91
第二节 不对称结构的特征 .....	95
第三节 主要特性介绍 .....	103
第四节 各类逆导及不对称晶闸管简介 .....	113
第五章 触发器件 .....	116
第一节 概貌与特征 .....	116
第二节 双向触发二极管 .....	120
第三节 硅单向开关与硅双向开关 .....	124
第四节 硅不对称双向开关 .....	131

## V

第五节	四层二极管及五层二极管 .....	133
第六节	单晶体管及互补单晶体管 .....	136
第七节	程控单晶体管及等价单晶体管 .....	142
第八节	触发用集成电路 .....	153
第九节	各种触发器件对比 .....	159
第十节	保护用器件 .....	159
第六章	其他组合型电力半导体器件 .....	164
第一节	不带触发电路的晶闸管组件堆 .....	164
第二节	带触发电路的晶闸管组件堆 .....	168
第三节	固态继电器 .....	170
第四节	固态接触器及其他固态开关 .....	175
第五节	单片组件 .....	180

### 快速型电力半导体器件

第七章	快速型电力半导体器件的理论基础 .....	183
第一节	电荷控制模式的基本概念 .....	184
第二节	电荷控制模式用于开关时间的估算 .....	188
第三节	PNPN 结构中的电荷控制模式 .....	196
第四节	晶闸管的导通瞬态 .....	198
第五节	贮存电荷的抽走与复合——关断过程 .....	207
第六节	晶闸管的关断瞬态 .....	213
第八章	快速晶闸管 .....	221
第一节	开关损耗与电流上升率 .....	222
第二节	门极结构设计 .....	227
第三节	少子寿命控制 .....	231
第四节	快速型晶闸管的应用 .....	235
第九章	可关断晶闸管 .....	249
第一节	概述 .....	249
第二节	门极关断及一维关断增益 .....	251

第三节	门极关断的瞬态过程及二维关断模型 .....	254
第四节	设计要点 .....	263
第五节	主要特性及应用特点 .....	266
第十章	门极辅助关断晶闸管 .....	271
第一节	正向恢复电流与门极辅助关断增益 .....	271
第二节	门极辅助关断晶闸管的结构及其效果 .....	276
第十一章	场控晶闸管 .....	284
第一节	场控晶闸管的提出 .....	284
第二节	场控晶闸管的结构 .....	286
第三节	场控晶闸管的作用原理及其特性 .....	288
第十二章	阳极门极晶闸管 .....	305
第一节	硅控制开关 .....	305
第二节	阳极门极晶闸管 .....	312
第三节	各种晶闸管的关断机理比较 .....	313

### 特殊触发型电力半导体器件

第十三章	光控晶闸管 .....	320
第一节	光电子学的兴起 .....	321
第二节	发光与光电 .....	323
第三节	光控晶闸管的基本原理 .....	327
第四节	光控晶闸管的应用 .....	329
第五节	大功率光控晶闸管 .....	334
第六节	大功率双向光控晶闸管 .....	350
第十四章	温控晶闸管 .....	353
参考文献	.....	359

# 第一章 概 述

电力半导体器件是电力电子技术中的核心部件，也是半导体器件中的一个重要分枝。一般说来，它的主要特征是功率较大，但也包括一些功率较小的特殊专用器件。

电力半导体器件中最为大家熟知的是普通晶闸管，即一般可控硅元件，它已广泛用于国民经济的各个领域。此外，功率晶体管和功率二极管（硅整流元件）也已有较久的发展历史。

随着电力电子技术的发展，近十余年来，新型电力半导体器件层出不穷，如双向晶闸管、快速晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管等等。

本书的主要内容及特点介绍如下：

(1) 本书专题介绍三十余种新型电力半导体器件，对一些主要器件，还详细地介绍了它们的发展历史、原理、特性及应用。

(2) 本书将电力半导体器件分为组合型、快速型和特殊触发型三大类。对各类器件都作了系统的介绍，例如：对组合型器件的组合关系作了分析与归纳；对各种快速型器件的关断机理作了系统的对比。

(3) 为了使读者顺利地阅读原理部分，本书还介绍了一些必要的基础理论。在介绍中，突出了两种模式，即以电流控制模式介绍了静态特性和以电荷控制模式介绍了动态特性。

(4) 在本书编写过程中参考了约四百篇中外文献，现将部分主要参考文献附于书末，供读者深入研究时查阅。

(5) 本书采用“晶体闸流管”（简称“晶闸管”）一词来代替过去常用的“可控硅”，而“可控硅整流元件”（SCR）一词仅在某些场合用作P型门极逆阻型晶闸管的专用名称。

## 第一节 电力电子学与电力半导体

近代电子学和半导体的发展有着密切的联系。因而在介绍电力电子学的形成前，先简单介绍一下半导体，特别是电力半导体的发展。

人们关于半导体知识的积累已有一个多世纪，但对半导体的认识是在本世纪二十年代用量子力学较好地解释了固体中的电子行为以后，才逐渐深化的。1947年第一个点接触晶体管的发现，为电子学的进展开创了一个新的纪元。

Shockley 于 1950 年第一次提出了电流增益大于 1 的 PNP 型晶体管。1952 年 Ebers 研究了 PNP 器件的等效电路。以后，由于硅单晶的发展，则开始用硅材料来试制 PNP 器件。因为硅器件的电流增益随发射极电流变化较大，所以有利于用电流来控制 PNP 器件的通断变化。1956 年 Moll 等人发表了两端硅 PNP 晶体管，第二年就出现了第一个三端 PNP 器件，当时的商品名称是可控硅整流元件（SCR）。值得注意的是，直到 1958 年第一次出现晶闸管的名称之前，在文献中都把晶闸管称为一种特种晶体管，即 PNP 晶体管或 PNP 三极管，因为从半导体理论来看，晶闸管实质上是两个晶体管的组合件，是晶体管的衍生物。



五十年代末六十年代初，半导体工艺开始向双扩散及平面外延等方向发展。从此，半导体器件分为两个分支，一支是发展规模愈来愈大的集成电路，一支是发展以晶闸管为主体的电力半导体器件。前者愈做愈小，后者愈做愈大；前者成为当代电子技术的主体，形成了一门新的学科——微电子学；后者则渗透到电气应用的各个部门，形成一门专门为电力技术服务的新学科——电力电子学。

电力电子学的含意，也在逐步地发展和完善。最初，从狭义来理解，则仅指晶闸管及其应用，因而也曾被称为晶闸管电子学；从广义地来理解，则连太阳能发电、热电发电、微波输电等方面都能包括在内。1974年以后，国际上开始接受 Newell 的定义，即把电力电子学作为介于电气工程三大主要领域——电力、电子、控制之间的边缘学科，如图 1-1 所示<sup>[1]</sup>。

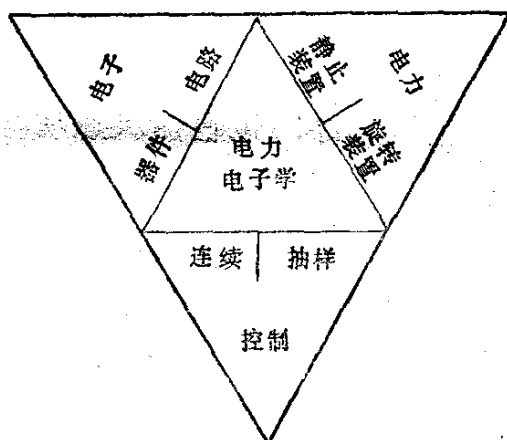


图 1-1 电力电子学——电气工程三大主要领域的交叉

电力电子学的发展进一步打破了电力和电子两个专业间的界限。原来，人们在提到电子学时，往往只想到它是一门信号处理的科学；在提到电力时，又只想到旋转机械、变压

器、架空输电线等等。实际上，电力电子学也和其他边缘学科一样，在开始时，总是按原有学科进行分散，然后才逐步凝聚成一门新的边缘学科。回顾电力电子学的形成，也经历了这一过程。

表 1-1 列出电力电子学的分类，由所列的类目也可大致看出电力电子学的内容和范围。

第一部分是系统及控制，它较多地列出了各种旋转机械传动装置和静止装置，但着眼点是在系统与控制，包括模拟与模式、信息处理及控制理论。

第二部分是电力半导体器件，目前电力半导体器件主要包括三大类元件：晶闸管、功率二极管与功率晶体管。晶闸管是电力半导体的主体，它又可分为普通晶闸管（一般可控硅元件）及特种晶闸管（派生可控硅元件）。本书所介绍的新型电力半导体器件，将以特种晶闸管为主，也包括其他一些电力电子技术中常用的特殊半导体器件。

关于二极管与晶体管只包括功率较大的部分，例如，功率二极管主要是指整流元件，也包括快速功率二极管、功率稳压二极管等。功率晶体管是电力半导体中的一种重要器件<sup>[2]</sup>，作为开关使用时其应用领域与晶闸管有许多重叠，例如大功率达林顿晶体管（或称巨型晶体管），其功率已和某些晶闸管相当，而其频率性能更优于晶闸管，所以在电力电子技术中的重要性日益增加。

电力电子学的第三部分是电力电路。可以把晶闸管电路主要分成自然换相电路和强迫换相（或自换相）电路两类。前者主要靠交流电网自然换相，如整流电路和交流开关电路；后者又分为电压（强迫）换相和电流（自）换相，象斩波器和自励式逆变器，就属于这一类。

表 1-1 电力电子学的分类

1. 系统及控制	2. 电力半导体器件	3. 电力电路及元件
1.00 一般系统及应用 (模拟, 模式)	2.00 一般器件	3.00 一般电路
1.10 控制理论及稳定性 分析	2.01 材料及制造工艺	3.10 电力系统元件
1.20 信息检出及信号发 生与控制	2.02 功率二极管	3.20 谐振和滤波器 (平 滑滤波、带通滤波)
1.30 旋转机械及其传动	2.03 功率晶体管	3.30 自然换相电路
1.31 直流机、励磁机和 直流传动	2.04 普通晶闸管	3.31 交流到直流变流器
1.32 交流机和交流传动	2.05 特种晶闸管	3.32 交流开关及交流电 力、电压调整器
1.33 无整流子电动机及 其控制	2.10 器件设计及保护	3.33 周波换流器
1.40 调压及调功装置 (控温, 焊接, 调光)	2.11 高压设计及过压保护	3.34 脉冲发生电路
1.50 高压直流输电装置 及其他	2.12 大电流设计, 通态 电压及冷却	3.35 他励式逆变电路
1.60 大型交流或直流电源	2.13 浪涌和脉冲电流、 瞬态热分析和熔断 器匹配	3.40 强迫换相用 (自换 相) 电路及技术
1.70 低功率或高频装置	2.14 $dV/dt$ 设计、阴极 短路及吸收保护	3.41 直流开关及直流斩 波器
1.80 其他应用	2.15 导通及 $di/dt$ 设计	3.42 逆变器
	2.16 关断及恢复	3.43 频率及功率因数变 换器, 有源滤波器
	2.17 串、并联补偿	

## 第二节 新型电力半导体器件的发展和分类

一种新型半导体器件的出现与发展, 主要决定于两个因素: 一是工业应用上的需要; 二是器件本身在理论或工艺上的突破。

当工业应用上需要更高频率的晶闸管时, 就有快速晶闸

表 1-2 电力半导体器件名称对照表

序号	器件名称	国外常用简称	国外常用名称	备注
1.	晶闸管		Thyristor	各种晶闸管的总称, 或特指普通晶闸管
2.	普通晶闸管 (可控硅整流元件)	SCR	Conventional SCR Silicon Controlled Rectifier	三端逆阻型P 门极晶闸管

组合型电力半导体器件

3.	双向晶闸管	Triac TAC BCR FLS	Bidirectional Controlled Rectifier Five Layer Switch	相当于一对反并联普通晶闸管
4.	MOS 双向晶闸管	Trimos	MOS-Controlled Triac	两个 DMOS 的组合
5.	对接双向晶闸管	Duo-Triac		阳极对阳极两个双向晶闸管对接
6.	逆导晶闸管	RCT ITR	Reverse-Conducting Thyristor Integrated Thyristor and Rectifier	相当于晶闸管和二极管的反并联
7.	不对称晶闸管	ASCR	Asymmetrical SCR	快速 (高频) 器件

8.	双向触发二极管	Diac			一般为三层器件
9.	硅单向开关	SUS	Silicon Unidirectional Switch		由稳压管控制的低压N门极晶闸管
10.	硅双向开关	SBS	Silicon Bidirectional Switch		相当于两个SUS反并联
11.	硅不对称双向开关	ASBS SAS SAT	Asymmetrical SBS Silicon Asymmetrical Switch Silicon Asymmetrical Trigger		相当于SBS串接一个稳压管
12.	四层二极管 (肖克莱二极管) (PNPN二极管)	FLD  BOD	Four Layer Diode Shockley Diode PNPN Diode Breakover Diode Reverse Switching Rectifier		保护用 大功率快速开关
13.	五层二极管 (硅对称开关)	SIDAC SSS Biswitch	Silicon Symmetrical Switch		分功率用或触发用两种
14.	单结晶体管 (双基极二极管)	UJT	Unijunction Transistor Double Base Diode		
15.	互补单结晶体管	CUJT	Complementary UJT		和UJT极性相反

序号	器件名称	国外常用简称	国外常用名称	备注
16.	程控单结晶体管 (互补晶闸管) (N门极晶闸管)	PUT NGT	Programmable UJT Complementary SCR N Gate Thyristor	小功率 N 门极晶闸管 ① 从长基区 N 层引出门极 ② 从短基区上的 N 区引出门极 (不同于 PUT)
17.	等价单结晶体管	EUJT	Equivalent UJT	包括 PUT, 晶体管等的集成元件
18.	移相用集成电路 触发器		Integrated Phase-Control Trigger Circuit	
19.	零电压开关用集成 电路触发器		Integrated Zero-Voltage Switching Circuit	
20.	硅对称雪崩二极管 (电压调制二极管)	DSAS VRD	Voltage Regulated Diode	保护用 保护、限压用 (小功率)
21.	晶闸管桥	SCB	Silicon Controlled Bridge	
22.	晶闸管组件		Thyristor Module	晶闸管、散热器、阻容保护, 脉冲 变压器的组合

23.	晶闸管组件堆	SCA	Silicon Controlled Assembly Thyristor Assembly (Stack)
24.	固态继电器	SSR	Solid State Relay
25.	固态接触器	SSC	Solid State Contactor
26.	固态开关	SSS	Solid State Switch Static Switch

快速型电力半导体器件

27.	快速晶闸管 (高频晶闸管)		Fast-Switching SCR	
28.	可关断晶闸管	GTO GCS	Gate Turn Off Thyristor Gate Controlled Switch Latching Transistor	门极加负信号可把晶闸管关断
29.	门极辅助关断晶闸管	GATT	Gate Assisted Turn Off Thyristor	阳极加反压, 同时门极加反压协助关断
30.	场控晶闸管 (静电感应晶闸管)	FCT FTD Gridistor SITH	Field Controlled Thyristor Field Terminated Diode Static Induced Thyristor	平面型 隐栅型 隐栅型

(续)

序号	器件名称	国外常用简称	国外常用名称	备注
31.	硅控制开关	SCS	Silicon Controlled Switch	四端小功率晶闸管, 也可作触发器件
32.	阳极门极晶闸管		Anode Gate Thyristor	长基区N层引出门极协助关断, 属四端大功率晶闸管
33.	功率晶体管		Power Transistor	单晶体管或达林顿晶体管
34.	达林顿晶体管 (巨型晶体管)	GTR	Darlington Transistor Giant Transistor	复合晶体管

## 特殊触发型晶闸管及其他光电子器件

35.	光控晶闸管	LASCR	Light Activated SCR	
36.	光控硅控制开关	LASCS	Light Activated SCS	光控四端小功率晶闸管
37.	光控双向晶闸管		Light Activated Triac	



38.	光控硅开关	LASS	Light Activated Silicon Switch	
39.	光控达林顿晶体管		Photo Darlington Transistor	
40.	PNPN负阻激光器		PNPN Negative Resistance Laser	
41.	光耦合器		Photo Coupler	控制光控晶闸管及固态继电器等
42.	发光二极管	LED	Light Emitting Diode	
43.	温控晶闸管		Thermosensor	

## 功率二极管

44.	功率二极管 (硅整流元件)	SR	Power Diode Silicon Rectifier	包括快速整流元件
45.	肖特基功率二极管		Schottky Power Diode	
46.	功率稳压管		Power Zener Diode	
47.	二极管组件		Molded Circuit Assemblies	