

电机工程手册

第 32 篇 电力半导体元件与变流器

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

73.21073

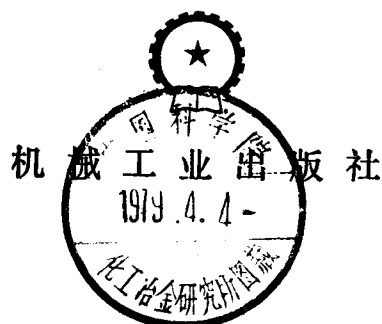
73.21073
210
32:2

电机工程手册

第32篇 电力半导体元件与变流器

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册
编辑委员会



本篇着重介绍了电力变流器的工作原理、主电路型式、主电量计算、均流、均压、保护、触发以及配套和辅助设备等设计方面的基本技术内容,包括常用的公式、数据和曲线。从应用出发,也概括介绍了硅整流管、硅晶闸管(可控硅)等硅元件的工作原理、设计、测试、特性数据和使用导则。

本篇主要供广大机电工人、技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,同时也可供教学及其他有关人员参考。

电 机 工 程 手 册

第 32 篇 电力半导体元件与变流器

(试 用 本)

西安整流器研究所 主编

*

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)

上海商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 9·字数 251 千字

1978 年 10 月上海第一版·1978 年 10 月上海第一次印刷

印数 00,001—68,000·定价 0.70 元

*

统一书号: 15033·4472

编 辑 说 明

(一)我国自建国以来,特别是无产阶级文化大革命以来,机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下,坚持政治挂帅,以阶级斗争为纲,贯彻“独立自主、自力更生”的方针,取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验,加强机械工业科学技术的基础建设,适应实现“四个现代化”的需要,我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》,使出版工作更好地为无产阶级政治服务,为工农兵服务,为社会主义服务。

(二)这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上,力求做到深入浅出,简明扼要,直观易懂,归类便查,以便广大机电工人使用,有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三)这两部手册是综合性技术工具书,着重介绍各专业的基础理论,常用计算公式,数据、资料,关键问题以及发展趋向。在编写中,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时,《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成,构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分,共七十九篇;《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分,共五十篇。

(四)参加这两部手册编写工作的,有全国许多地区和部门

的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员,更为广泛。许多地区的科技交流部门,为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中,广泛征求广大机电工人的意见,坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则,发挥了广大群众的智慧和力量。

(五)为了使手册早日与读者见面,广泛征求意见,先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验,试用本在内容和形式方面,一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证,提出批评和建议,以便今后出版合订本时加以修订。

(六)本书是《电机工程手册》第32篇,由西安整流器研究所主编,西安电力整流器厂参加编写。西安交通大学、北京变压器厂、上海整流器厂等许多单位对编审工作给予大力支持和帮助,在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

常用符号表

b ——网侧电压的容许负波动(下降)幅度对额定值的百分值	S ——脉动率, 转差率
$\cos \varphi$ ——位移因数	S_T ——变压器等值容量
d ——直流电压调整率, 以 U_{d40} 的百分值表示	s ——串联换相组数
d_{bN} ——额定直流电流下, 由变流电抗器引起的总直流电压调整率	T ——绝对温度
$\frac{di}{dt}$ ——通态电流上升率	t_{gt} ——门极控制开通时间
d_{LN} ——额定直流电流下, 由交流电网系统阻抗引起的附加直流电压调整率	t_q ——电路换相关断时间
d_s ——主变压器和平衡电抗器引起的直流电压调整率	U_{ARM} ——臂的反向工作峰值电压
$\frac{du}{dt}$ ——断态电压上升率	U_d ——直流电压
d_{sN} ——在额定直流电流下的总感性直流电压调整率	U_{d40} ——理想空载直流电压
e ——变压器短路电压百分值	U_{d40a} ——有相位控制角时的理想空载直流电压
e_s ——变压器短路电压百分值 e 的漏抗分量	U_{dN} ——额定直流电压
g ——并联换相组数	U_{DRM} ——断态重复峰值电压
$I_{A(AV)}$ ——臂的工作电流平均值	U_{DSM} ——断态不重复峰值电压
I_{dN} ——额定直流电流	U_{DWM} ——断态工作峰值电压
$I_{F(AV)}$ ——硅整流管的正向平均电流(泛指硅元件时, 通用 $I_{T(AV)}$ 代替)	U_F ——硅整流管的正向电压(泛指硅元件时, 用 U_T 代替)
I_{FSM} ——硅整流管的浪涌电流(泛指硅元件时, 以 I_{TSM} 代替)	$U_{F(AV)}$ ——硅整流管正向平均电压(泛指硅元件时, 用 $U_{T(AV)}$ 代替)
I_G ——门极电流	U_{GT} ——门极触发电压
I_H ——维持电流	U_L ——变压器网侧电压(线电压)
I_L ——变压器网侧电流	U_{LN} ——变压器网侧额定电压
I_{nL} ——额定电流下, 网侧 n 次谐波电流的均方根值	U_n ——直流电压中 n 次谐波电压的均方根值
I_R ——反向电流	U_{nN} ——额定直流电压下的 U_n 值
$I_{RR(AV)}$ ——反向重复平均电流	U_{RRM} ——反向重复峰值电压
I_{RRM} ——反向重复峰值电流	U_{RSM} ——反向不重复峰值电压
$I_{RS(AV)}$ ——反向不重复平均电流	U_{RWM} ——反向工作峰值电压
I_{RSM} ——反向不重复峰值电流	U_T ——通态电压
I_{TSM} ——硅元件的通态不重复峰值电流(浪涌电流)	$U_{T(AV)}$ ——通态平均电压
I_V ——变压器阀侧电流	U_{TO} ——门槛电压
k ——玻耳兹曼常数	U_{VO} ——变压器阀侧线电压
K ——变压器网侧线电压与阀侧线电压之比	U_σ ——直流侧纹波电压的均方根值
K_b ——电网电压的升高系数	u ——瞬时电压, 重迭角
K_I ——均流系数	u_0 —— $\alpha=0$ 时的重迭角
K_u ——均压系数	v ——畸变因数
K_s ——变压器感抗电压降折算系数	X_{bL} ——阀侧每相电抗
L_G ——臂电感	X_k ——换相感抗
L_d ——平波电感	X_t ——变压器折算到阀侧的每相感抗
L_s ——支路的串联电感	Z ——瞬态热阻抗
L_t ——变压器折算到阀侧的每相漏感	α ——滞后角
p ——脉波数	α_N ——预留角
Q_r ——反向恢复电荷	α_p ——固有滞后角
q ——换相次数, 电子(空穴)的电荷量	β ——超前角
R ——电阻, 热阻	γ ——裕度角(熄灭角)
	λ ——功率因数
	θ ——温度
	θ_J ——等效结温
	θ_A ——环境温度

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 概 述

- 1 变流技术的发展 32-1
- 2 硅变流器的构成 32-2
- 3 硅元件的类型和用途 32-2
- 4 变流器的类别和用途 32-3

第2章 硅整流管(硅整流元件)

- 1 硅整流管的工作原理和基本特性 32-4
- 2 硅整流管的结构和管芯制造工艺 32-6
- 3 硅整流管特性参数的设计 32-7
 - 3.1 正向特性参数的设计 32-8
 - 3.2 反向特性参数的设计 32-9
- 4 硅整流管设计举例 32-10

第3章 普通硅晶体闸流管 (可控硅整流元件)

- 1 硅晶闸管的工作原理和基本特性 32-11
- 2 硅晶闸管的结构和管芯制造工艺 32-13
- 3 硅晶闸管特性参数的设计 32-13
 - 3.1 通态特性参数的设计 32-15
 - 3.2 阻断特性参数的设计 32-16
 - 3.3 门极特性参数的设计 32-21
 - 3.4 动态特性参数的设计 32-22
- 4 硅晶闸管设计举例 32-24

第4章 其他硅晶体闸流管

- 1 快速硅晶闸管(快速可控硅整流元件) 32-24

- 1.1 快速硅晶闸管的频率特性 32-24

- 1.2 快速硅晶闸管设计与制造要点 32-25

- 2 逆导硅晶闸管(逆导可控硅元件) 32-25

- 2.1 逆导硅晶闸管的额定电流及换流特性 32-26

- 2.2 逆导硅晶闸管的设计与制造要点 32-26

- 3 双向硅晶闸管(双向可控硅元件) 32-26

- 3.1 双向硅晶闸管的触发方式 32-26

- 3.2 双向硅晶闸管的额定电流及换流特性 32-27

- 3.3 双向硅晶闸管的设计与制造要点 32-27

- 4 可关断硅晶闸管(可关断可控硅整流元件) 32-27

- 4.1 可关断硅晶闸管的门极特性及电流关断增益 32-28

- 4.2 可关断硅晶闸管的设计与制造要点 32-28

第5章 硅元件特性参数的测试

- 1 伏安特性参数测试 32-29

- 1.1 正、反向耐压测试 32-29

- 1.2 额定通态平均电流及通态平均电压测试 32-29

- 1.3 浪涌电流测试 32-30

- 2 门极特性测试 32-31

- 2.1 门极触发电流和电压测试 32-31

- 2.2 门极不触发电流和电压测试 32-31

- 3 维持电流测试 32-31

- 4 动态特性参数测试 32-31

- 4.1 门极控制开通时间测试 32-31

- 4.2 电路换向关断时间测试 32-32

- 4.3 断态电压临界上升率测试 32-32

- 4.4 通态电流临界上升率测试 32-33

5 普通硅晶闸管特性参数的实用测试电路	32-33
---------------------------	-------

第6章 硅元件使用导则

1 硅元件的系列和特性数据	32-36
2 特性数据的应用	32-40
2.1 通态电流和电压	32-40
2.2 断态电压和电流	32-42
2.3 门极触发特性	32-42
2.4 动态特性参数	32-43
3 硅元件的冷却方式和散热器的选配	32-45
3.1 冷却方式和散热器种类	32-45
3.2 散热器的容许热阻和安装使用注意事项	32-45
4 硅元件在周期变化负载条件下的电流容量	32-49
4.1 瞬态热阻抗曲线	32-49
4.2 硅元件在周期变化负载下等效结温和电流容量的计算	32-49
4.3 计算实例	32-51

第7章 变流器的基本概念 和主电路电量的计算

1 变流过程及有关概念	32-52
1.1 整流	32-52
1.2 换相过程	32-53
1.3 相位控制	32-54
1.4 变流器的运行状态	32-54
1.5 逆变和逆变器	32-54
2 主电路电量计算关系及电联结型式	32-54
2.1 主电量的基本计算关系	32-54
2.2 电联结型式的选择	32-55
3 整流管整流器的主电量计算	32-55
3.1 理想空载直流电压	32-55
3.2 主电量计算	32-60
4 晶闸管整流器的主电量计算	32-60
4.1 理想空载直流电压	32-61
4.2 主电量计算	32-61

4.3 重迭角、最小超前角、最小滞后角和预留角	32-61
-------------------------------	-------

4.4 阀侧与网侧电流的精确计算	32-64
------------------------	-------

5 纯电阻负载下直流电流不连续时的主电量计算	32-65
5.1 纯电阻负载下直流电流连续的临界条件	32-65
5.2 相位控制特性和主电量计算	32-65
6 反电势负载时的主电路计算特点	32-69
6.1 电池负载	32-69
6.2 直流电动机负载	32-70
6.3 抑制环流所需的电抗器电感的计算	32-72
6.4 直流电感的计算举例	32-73

第8章 变流装置的设计计算

1 负载等级与额定值	32-74
1.1 负载等级和额定直流电流	32-74
1.2 变流装置过载能力	32-75
1.3 额定直流电压	32-75
2 硅元件并串联技术	32-75
2.1 并联支路数的确定	32-75
2.2 串联元件数的确定	32-76
2.3 并联支路间的均流	32-76
2.4 硅元件的排列与引出母线位置对均流的影响	32-77
2.5 串联元件的均压	32-78
3 过电压抑制	32-79
3.1 交流浪涌(操作)过电压的抑制	32-79
3.2 直流侧过电压抑制电路	32-84
3.3 换相过电压抑制电路	32-84
3.4 雷击过电压抑制	32-85
3.5 静电感应过电压抑制	32-85
4 电流、电压上升率的抑制	32-86
4.1 电流上升率的抑制	32-86
4.2 电压上升率的抑制	32-86
5 短路保护与故障检测	32-87
5.1 短路电流的计算	32-88
5.2 过电流、短路保护设备和器件的选用	32-89

5.3 硅元件的故障检测	32-89
6 变流器的效率、直流电压调整率和 功率因数	32-91
6.1 效率、变流因数和损耗	32-91
6.2 直流电压调整率	32-91
6.3 功率因数	32-92
7 变流器设计举例	32-94

第9章 晶闸管变流器的触发电路

1 对触发装置的基本要求及其组 成	32-99
1.1 基本要求	32-99
1.2 主要组成	32-99
2 触发电路实例	32-100
2.1 阻容移相触发电路	32-100
2.2 单结晶体管触发电路	32-100
2.3 具有移相角限位的正弦波同步触发 电路	32-102
2.4 锯齿波同步触发电路	32-103
2.5 集成电路触发器	32-104
2.6 脉冲放大电路	32-104
2.7 触发电路的输出环节	32-105
3 触发电路和主电路同步关系的确 定方法	32-105
4 触发器的抗干扰措施	32-106
5 脉冲变压器的计算方法	32-106

第10章 配套和辅助设备

1 变流(整流)变压器	32-107
1.1 额定值	32-107
1.2 换相电抗	32-107
1.3 “单拍”变流器用的变压器	32-108
1.4 采用自耦变压器时的设计考虑	32-108
1.5 省去交流变压器时的设计考虑	32-108
2 调压设备	32-108
2.1 调压方式和调压设备的类型和特 点	32-108

2.2 调压自耦变压器和多重并联	32-110
2.3 调压用饱和电抗器	32-110
3 谐波分量和滤波器参数	32-113
3.1 网侧电流的谐波分量	32-113
3.2 直流电压的谐波分量	32-115
3.3 谐波分量的计算举例	32-116
3.4 纹波电压与滤波器参数	32-116
3.5 其他电抗器	32-117
4 冷却设备及其他	32-118
4.1 发热和冷却的计算	32-118
4.2 风机和水冷却装置	32-118
4.3 柜体的涡流发热和噪音问题	32-119
5 提高功率因数的措施	32-120
5.1 无功功率的抑制措施	32-120
5.2 无功功率的补偿措施	32-120

第11章 变流器的应用

1 直流电动机供电用晶闸管变流 器	32-121
1.1 电流不可逆单变流器	32-121
1.2 电流可逆双变流器	32-121
1.3 电流可逆单变流器	32-123
2 逆变器	32-123
2.1 电网换相(有源)逆变器	32-123
2.2 自换相(无源)逆变器	32-124
3 直接式变频器	32-128
3.1 直接式三相降频变频器——周波变换 器	32-128
3.2 直接式升频变频器	32-129
4 电力电子开关	32-130
4.1 相位控制开关(相控开关)	32-130
4.2 控制通断比的交流开关	32-133
4.3 直流开关和直流斩波器	32-133

附录 变流器额定直流电压、直流电 流等级(推荐值)	32-135
参考文献	32-135

第1章 概 述

在工业生产中，如电解和直流电动机等都需要由直流电源供电，据统计在总发电量中有百分之十几到二十几的交流电需要用整流器变成直流电才能使用；又如中频感应炉等设备，则需要用变频器将工频电源变换到设备所需频率的电源；电子计算机和载波通讯系统又需要保证一旦在正常交流电源中断时，立刻用逆变器将蓄电池电能转换成工频交流电能，作为“不停电电源”使用。变流器就是这种整流器、逆变器以及借助变流元件使电源系统的电压、频率、相数和其他电量或特性发生变化的一类电器设备的统称。

1 变流技术的发展

早期使用的变流器(整流器)有离子二极管整流器、闸流管整流器、硒整流器、电动发电机组、汞弧整流器(包括励弧管和引燃管)和机械整流器，其中作为电力变流器推广应用的主要有电动发电机组、汞弧整流器和机械整流器。机械整流器的特点是损耗低，但是对负载波动比较敏感，并且有旋转部分。电动发电机组效率较低，其旋转部分的维修困难，但对电网冲击和干扰则很小。汞弧整流器的特点是没有旋转部分，电压可连续调节，其效率介于机械整流器和电动发电机组之间。

锗和硅的电力半导体元件(以后简称锗或硅元件)先后出现于五十年代，他们所组成的变流器不但兼有汞弧整流器和机械整流器两者的优点，还具有体积小、功率大和维护使用方便等优点，且控制性能远比汞弧整流器为佳，因此得到迅速发展。但是，锗元件由于在允许电流密度、耐电压和工作温度等方面的性能都不如硅元件，所以硅元件出现以后，锗元件在电力变流器中已很少使用。

目前，电动发电机组只用于那些电网容量比较小，且不能适应硅变流器所产生的谐波干扰和冲击的大型直流电气传动中；汞弧整流器

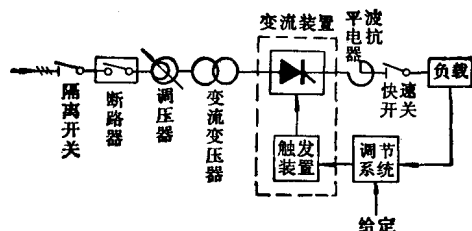


图 32.1-1 硅变流器系统示意图

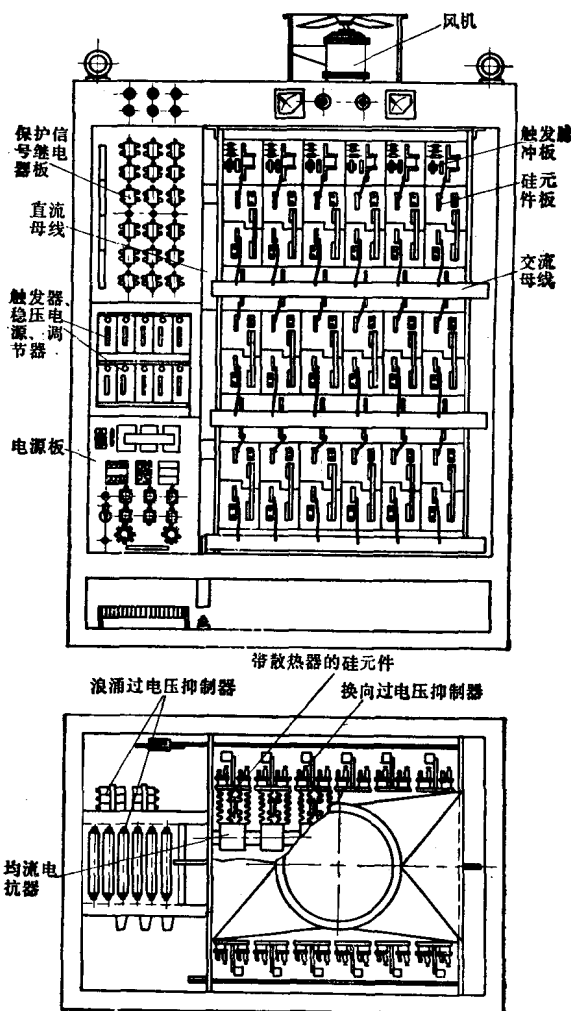


图 32.1-2 硅晶闸管变流装置结构概貌

仅在直流输电与电焊机控制(电焊用引燃管)中尚有少量使用;而硅元件及其变流器在变流技术领域内的应用最广。所以,本篇主要介绍硅元件和它组成的变流器。

2 硅变流器的构成

变流器(或称变流设备)通常包括调压器、交流变压器、变流装置及平波电抗器等几部分。晶闸管变流器的系统示意图见图 32·1-1。当变流装置由整流管组成,而又需连续调压时,可加设饱和电抗器等其他调压设备。

变流装置通常由硅元件、冷却、保护、检测和触发等几部分组成。这些部(组)件一般都装在一个或几个柜体内。图 32·1-2 为卷扬机直流传动供电用

的风冷硅晶闸管变流装置的结构概貌。

3 硅元件的类型和用途

作为硅变流器主要组成部分的硅元件分为硅整流管和硅晶体闸流管(简称硅晶闸管)两大类。

硅整流管一般分为普通(型号为 ZP)和快速(ZK)两种类型。普通整流管主要用于一般整流设备,快速整流管主要用于频率较高的设备。

硅晶闸管可分为二端、三端和四端三种器件。作为电力变流器应用的主要是三端器件,其类型与主要用途见表 32·1-1 所示。二端和四端器件一般只作为信号、触发、控制、保护、放大等使用,故本篇不作介绍。

表 32·1-1 三端硅晶体闸流管类型和主要用途

名 称	特 征	型 号	符 号	用 途
普通硅晶闸管(习称普通可控硅整流元件)	反向阻断,门极信号开通	KP		整流器、逆变器、变频器
快速硅晶闸管(习称快速可控硅整流元件)	反向阻断,门极信号开通。关断时间短,开通速度快	KK		中频电源、超声波电源等
可关断硅晶闸管(习称可关断可控硅整流元件)	门极正信号开通,负信号关断	KG		步进电机电源、彩色电视扫描电路、汽车点火系统、直流开关等
逆导硅晶闸管(习称逆导可控硅元件)	反向导通,门极信号开通(相当于普通晶闸管与整流管反并联)	KN		斩波器、逆变器
双向硅晶闸管(习称双向可控硅元件)	双向均可由门极信号开通(相当于两只普通硅晶闸管反并联)	KS		电子开关、调光器、调温器等

4 变流器的类别和用途

变流器一般分为整流管变流器和晶闸管变流器两大类。整流管变流器本身仅能完成整流作用,只有采用附加设备(如调压变压器或饱和电抗器等)才能实现一定程度的电压调节作用。因此,整流管变流器主要作为一般的直流电源使用。晶闸管变流器由于它具有良好的控制性能,其本身即能连续地、大幅度地调节电压和电流,与其他控制设备(如半导体调节器、电子计算机等)组合便能构成新型的电能变

换系统。因此,晶闸管变流器的应用范围比整流管变流器要广泛得多。晶闸管变流器的出现,使变频器、逆变器的应用有了很大发展,并出现如斩波器、交流无触点开关及各种稳定电源等新型变流器。表 32-1-2 为主要变流器类别、用途和特点。

变流技术的进一步发展,对电工产品的革新也带来了很大影响,产生了诸如晶闸管无整流子电机、晶闸管有载分接开关等一系列新型电工产品。因此,变流技术的发展必将对我国的工业发展作出重要贡献。

表 32-1-2 变流器的主要类别、用途和特点

序号	用 途 类 别	系列代号①	典 型 用 途	性 能 特 点	单台设备容量范围
1	电 化 学	GH _F ^S KGH _F ^S	铝、镁等有色金属电解,水、食盐等化工电解,石墨化电炉加热	容量大,负载平稳,有较高的效率和功率因数	直流 36~1000 V 800~50000 A
2	直 流 牵 引	GQF、KGQF	干线电力机车	大功率单相整流	直流 2000~6000 kW
		GQ _A ^F	矿山牵引、城市无轨电车、地下铁道等变电站	负载变化大,一般采用整流管整流设备	直流 275~1650 V 100~2250 A
3	直 流 传 动	KGS _F ^A (电流不可逆)	造纸、印染等轻工业传动	负载较平稳,有一定的稳速要求	直流 0.5~500 kW
		KGS _S ^A (电流可逆)	可逆轧机、连轧机、卷扬机、龙门刨等	负载急剧变化,要求频繁反向或快速制动,一般用双变流器供电	直流 5~5000 kW
4	交 流 传 动	KGJ _F ^A (串级调速)	风机、泵、卷扬机、起重机、球磨机及传送带等调速	用电网换相逆变器将电动机转差功率反馈到电网,能无级调速,效率较高,当调速比要求降低时,装置容量随之减小	交流 100~8000 kW
		KGM _F ^A (变频调速)	超高速电动机速度控制、多台设备的同步调速系统、高精度调速或稳速系统	由自换向逆变器或周波变换器供电	交流 0.5~1500 kW
5	电 机 励 磁	KGL _F ^A	同步电动机的直流励磁	能自动投励、强励及调节功率因数	直流 50~170 V 200~600 A
		KGL _S ^A	大型发电机、小型水力和柴油发电机的直流励磁	强励时短时过载倍数较高,大型发电机励磁装置的可靠性要求高	直流 1000 V 1800 A (100~200 MW 级的汽轮发电机励磁)
6	电镀及电加工	KGDS	电镀电源	电压低,电流大,有防腐蚀要求	直流 6~24 V 50~5000 A
		KGXS	电解加工电源	有稳压或稳流要求,其余同上	直流 12~24 V 500~10000 A

(续)

序号	用途类别	系列代号①	典型用途	性能特点	单台设备容量范围
7	充电	KGCA	蓄电池充电	负载为反电势性质, 较平稳	直流 18~360 V 15~300 A
		KGVA _F (浮充电)		对输出直流电压的纹波限制较严	直流 36~330 V 15~400 A
8	电磁合闸	KGKA	电动操作机构电源, 电磁吊车的电磁铁吸盘供电	短时冲击性负载	直流 110、220 V 100~300 A
9	中频感应加热	KGPF _S	金属熔炼、热处理、热加工、焊接等加热电源	能自动调整频率适应负载变化的需要	交流 400~8000 Hz 25~2000 kW
10	交流不停电电源 (交流备用电源)	KGNA _F	通讯设备、电子计算机、电站照明的交流备用电源	反应快, 能不间断地自动投入运行	交流 1~1000 kW
11	电子开关	KGZA _F (无触点开关)	交流电动机频繁操作, 功率因数补偿电容器组的自动切换及电焊机、电炉等控制开关	能适应每分钟数十次开关的要求, 作为开关使用时要求过载能力较高, 可用控制通断比方式自动调节负载功率	交流 380 V 100~600 A
		KGZA _F (直流斩波器, 又称脉冲调速)	矿山和地下铁道直流机车、蓄电池为动力的电动车辆的调速	无级调速(调压), 加速平稳, 效率和功率因数高	直流 110~1650 V 40~400 kW
12	高压静电除尘	GGA KGGA	静电除尘, 原油脱水, 静电喷涂等高压电源	电压高, 电流很小, 对短路电流限制较严	直流 40、60、80 kV 100~1000 mA
13	直流输电		远距离超高压输电, 跨海峡电缆输电等变流站	阀体工作电压高, 必须用多元件串联	直流 100~1000 kV 10~1000 MW

① 变流装置的系列代号一般由四位汉语拼音字母组成: 首位有 K 者表示晶闸管变流装置, 无 K 者表示整流管整流装置; 第 2 位 G 表示半导体元件用单晶硅材料制成; 第 3 位是表示装置用途的代号; 第 4 位代表装置的冷却方式(S—水冷, F—风冷, A—自冷)。

第2章 硅整流管(硅整流元件)

硅整流管是一种以硅单晶 Θ 为基本材料, 利用半导体 PN 结单向导电性能而制成的固态整流管。

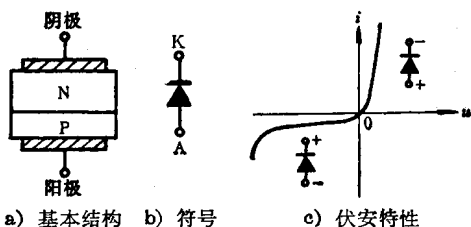


图 32-2-1 硅整流管的基本结构、符号及伏安特性

它的基本结构、符号及伏安特性见图 32-2-1。单个硅整流管的电压一般为几十伏至几千伏, 高的可达一万伏; 电流为几安至几百安, 高的可达几千安。

1 硅整流管的工作原理和基本特性

硅单晶有 P 型和 N 型两种导电类型。在 P 型

① 本章所述的硅整流管制造和设计都以 N 型硅单晶为基片, 如用 P 型基片时, 其结构和计算公式应作相应的变动。

硅单晶中,空穴是多数载流子(简称多子),电子是少数载流子(简称少子),带正电荷的空穴对导电起主要作用;在N型硅单晶中,电子是多子,空穴是少子,带负电荷的电子对导电起主要作用。

硅整流管的核心是PN结。PN结具有单向导电的整流作用,是由于P区的空穴浓度高于N区的空穴浓度;N区的电子浓度高于P区的电子浓度。这一浓度差使PN结交界面附近P区的空穴向N区扩散,并与N区电子复合;N区的电子向P区扩散,并与P区空穴复合。于是在PN结交界面附近的P区因缺少空穴而带负电荷,N区因缺少电子而带正电荷。由这些正、负电荷形成的电场称为自建场,方向由N区指向P区,它阻止空穴继续向N区和电子向P区扩散,最后达到动态平衡,这时的电荷区称为空间电荷区,见图32-2-2。在空间电荷区中,载流子极少,故为高阻区,而且电子由N区到达P区或空穴由P区到达N区都要克服势垒的作用,所以这个区有时又称为耗尽层、阻挡层或势垒区。

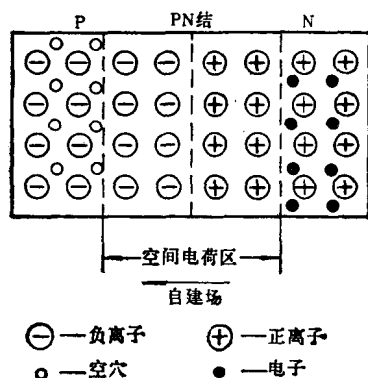


图32-2-2 无外加电压时PN结空间电荷区

当在PN结上加正向电压(即P端接正、N端接负电压)时,外加电压的方向与自建场方向相反,削弱了电场,破坏了平衡,使势垒区变狭,势垒高度下降,而有利于扩散,于是就有大量空穴向N区和电子向P区流动,产生正向电流。由于P区和N区内多子的浓度很高,所以在PN结上稍加正向电压,就会引起正向电流大量增加,电流密度可达几十安/厘米²至千安/厘米²。

相反,在PN结上加反向电压(即P端接负,N端接正电压)时,所加电压方向与自建场方向相同,它加强了电场,使势垒区变宽、势垒高度增加,进一步阻止空穴向N区和电子向P区流动。这外加电

压阻止多子流动,但促使N区的少子流向P区和P区的少子流向N区,产生反向电流。由于P区和N区内少子的浓度很低,所以开始反向电流随反向电压的增加有所增加,随后不再增加而达到饱和值,此值称为反向饱和电流。在理论上反向饱和电流是很小的,但实际的反向电流由于还包括势垒区的产生电流和表面漏电流,他们在一定程度上随电压升高而有所增大。

上述的单向导电性能,就是PN结的整流特性。图32-2-3为硅整流管的特性参数示意图。图中符号所代表的特性参数的名称及定义见表32-2-1。

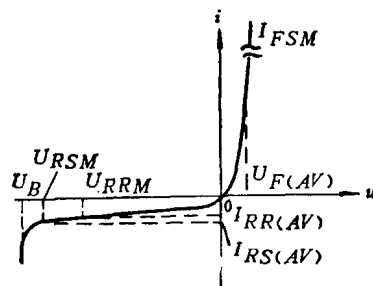


图32-2-3 硅整流管的特性参数示意图

表32-2-1 硅整流管特性参数的名称、符号及定义

特性参数名称	符号	定义
额定正向电流	$I_{F(AV)}$	硅整流管在电阻性负载的单相工频正弦半波电路中,在环境温度 $+40^{\circ}\text{C}$ 和规定冷却条件下,结温稳定且不超过额定结温时,所允许的最大正向平均电流
正向平均电压	$U_{F(AV)}$	硅整流管通以额定正向平均电流,待结温稳定后,阳极-阴极间电压的平均值
正向峰值电压	U_{FM}	硅整流管通以额定正向平均电流,待结温稳定后,阳极-阴极间电压的峰值
浪涌电流	I_{FSM}	硅整流管通以额定正向平均电流,待结温稳定后,在工频正弦波半周期间能承受的最大过载峰值电流
反向不重复峰值电压	U_{RSM}	不可重复施加且持续时间不大于10毫秒的最大脉冲电压
反向重复峰值电压	U_{RRM}	可施加重复率为每秒50次且每次持续时间不大于10毫秒的最大脉冲电压,其值为 $80\% U_{RSM}$
反向不重复平均电流	$I_{RS(AV)}$	对应于 U_{RSM} 的平均漏电流
反向重复平均电流	$I_{RR(AV)}$	对应于 U_{RRM} 的平均漏电流

当外加反向电压增大至一定程度时,因空间电荷区的电场很强,使进入空间电荷区的电子(或空穴)获得足够的能量,它们与原子碰撞,使原子电离而产生新的电子、空穴对。这些新产生的电子和空穴在强电场作用下,彼此向相反方向运动,在运动过程中,又碰撞出新的电子、空穴对,如此倍增作用的结果,使电子和空穴的增加如同雪崩,反向电流便突然增大,即出现所谓雪崩击穿。这时的外加反向电压即为雪崩击穿电压 U_B 。当雪崩击穿发生在较大的PN结面积上,即功率损耗能分布在较大的面积

上时,则不至使PN结损坏;当雪崩击穿发生在PN结的某一局部时,则突然增大的电流仅集中在发生击穿的部位,就会因热量集中而将PN结烧毁。

2 硅整流管的结构和管芯制造工艺

硅整流管一般分为螺栓型和平板型两种,其结构见表32-2-2。制造硅整流管的主要工艺流程如图32-2-4所示,它的关键是制造管芯。管芯的制造方法、结构及工艺见表32-2-3。

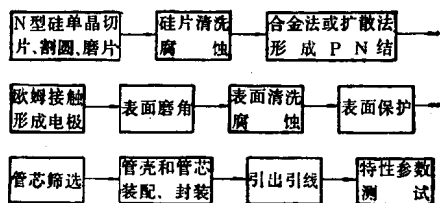


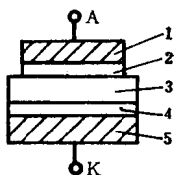
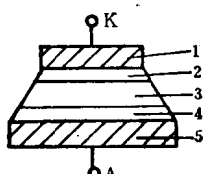
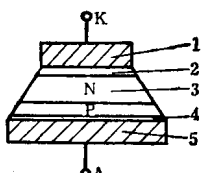
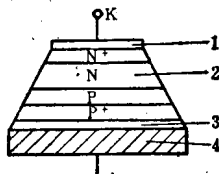
图 32-2-4 制造硅整流管的主要工艺流程

表 32-2-2 硅整流管的结构

	外形①	结构
螺栓型		1—引线 2—软连接压接件 3—引线焊接处 4—玻璃-金属外壳 5—管壳、管座焊接处 6—管芯 7—管座
平板型		1—银片 2—阴极陶瓷外壳 3—焊接处 4—阳极陶瓷外壳 5—阴极内压块 6—管芯
说明	螺栓型安装和更换方便。平板型的阳极、阴极侧都装散热器,散热效果好,200 A 以上大电流硅整流管大多采用平板型 外壳起密封作用,以防潮气及其他有害气体侵入而影响硅整流管性能。螺栓型管壳与管芯用焊料焊接或用蝶形弹簧压接。平板型内外电极、阴极压块和管芯之间,利用散热器外加压力压接	

① 硅整流管的散热器类型见图 32-6-17。

表 32-2-3 硅整流管管芯制造方法、结构及工艺

制 造 方 法	结 构	工 艺	说 明
合 金 法	 1—上铜片 2—铝片 3—N型硅片 4—合金片 5—下铜片	将上铜片、铝片、N型硅片、合金片(银-铅-锡或金-锡片)和下铜片迭放在模具内,在真空炉中一次烧结成管芯	工艺流程短,少子寿命容易控制,但较难获得平坦的PN结。正烧法不能进行表面造型,适用于制造低电压硅整流管。反烧法能进行表面造型、磨角以提高电压
	 1—上铜片 2—合金片 3—N型硅片 4—铝片 5—下铜片	将上铜片、合金片、N型硅片、铝片和下铜片迭放在模具内,在真空炉中一次烧结成管芯	
扩 散 法	 1—上铜片 2—银-铅-锡片或金-锡片 3—扩散后硅片 4—铝片 5—下铜片	用扩散炉,在N型硅片中,扩铝(或硼、镓)等P型杂质以形成PNP结,磨去一边P区后,在真空炉中,两边分别烧上铝和银-铅-锡以形成欧姆接触。为便于引线,上、下铜片的一边先镀镍后,再烧上银-锡合金	因扩散法能形成平坦的结,故关键部分的PN结用扩散法制作。欧姆接触部分如NN ⁺ 、PP ⁺ 用合金法制作,工艺简单,适用于制造一般硅整流管
	 1—蒸铝或蒸金或烧银-铅-锡焊料 2—扩散后硅片 3—铝片(铝片不镀镍)或银-铅-锡(铝片镀镍)焊料 4—下铜片	用扩散炉,在N型硅片中,扩铝(或硼、镓)等P型杂质以形成P区和P ⁺ 区,磨去一边P区后,扩磷等N型杂质以形成N ⁺ 区,然后用烧结、电镀或蒸发等方法接出电极	

3 硅整流管特性参数的设计

硅整流管的特性和结构参数之间存在着一定的相互矛盾关系(见表 32-2-4),例如要求硅整流管的反向电压高,则在设计时必须选用电阻率较高、片子

较厚的硅片,但这将导致正向压降增大;若要降低正向压降,又必须选用少子寿命较长或片子较薄的硅片。因此,在设计时应根据不同要求,抓住矛盾的主要方面,作出正确的协调。

目前,对于大电流、高电压的硅整流管,常采用

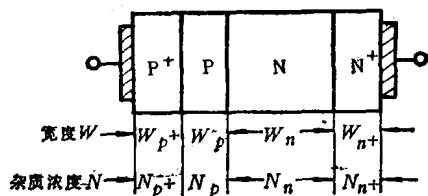
表 32-2-4 硅整流管结构参数变化对特性参数的影响

特性参数	硅片电阻率增加	硅片厚度增加	硅片直径增加	硅片少子寿命增加
反向电压	↑	↑	↓	
反向电流	↑	↓	↑	↓
正向电流	↓	↓	↑	↑
正向压降	↑	↑	↓	↓
过载能力	↓	↓	↑	↑
反向恢复时间		↑	↑	↑
热阻		↑	↓	

注: 1. ↑↑表示特性参数提高的程度, ↑提高大, ↑提高小。

2. ↓↓表示特性参数下降的程度, ↓下降大, ↓下降小。

P⁺PNN⁺结构,如图32-2-5所示。P⁺和N⁺高浓度重掺杂区的存在,在通大电流时,可以从P⁺区和N⁺区向P区和N区注入大量载流子,从而提高P区和N区的电导率,以降低体电阻,使体压降下降到可以忽略的程度。这种电导率的改变,叫电导调制作用。利用电导调制作用容易制得反向耐压高而正向压降小的硅整流管。下面介绍这种结构的设计要点。

图 32-2-5 硅整流管芯 P⁺PNN⁺ 结构示意图

3.1 正向特性参数的设计

正向特性参数主要有正向电流和正向压降。一般为提高正向电流,可适当增加PN结面积,但从根本上解决问题,应从提高电流密度着手,如降低正向压降,改善散热条件(设计性能良好的散热器、采用高效冷却介质)等。

电流密度应根据硅整流管的工作结温、过载能力及反向电压等要求选取,一般200安硅整流管选用80安/厘米²左右,500安硅整流管选用70安/厘米²左右,1000安硅整流管选用50安/厘米²左右。

正向压降是势垒压降、体压降和接触压降的总和,其设计原则如下:

a. 势垒压降 势垒压降是在势垒区上的电压降。硅整流管的势垒压降一般峰值为0.6~0.8伏(平均值为0.3~0.4伏)。势垒压降的计算比较复杂,必须分析在不同电流密度下,PN结两边的载流子分布。对于具有P⁺PNN⁺结构的硅整流管,在正向导电时的势垒压降 U_J 可近似地用下式表示:

$$U_J = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{j \sqrt{W_{p^+} W_{n^+}} \sqrt{N_{p^+} N_{n^+}}}{2q D n_i^2} \right] \quad \text{V} \quad (32-2-1)$$

式中 j ——电流密度 A/cm²

n_i ——本征载流子浓度,

$$n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

W_{p^+}, W_{n^+} ——P⁺区、N⁺区宽度 μ

N_{p^+}, N_{n^+} ——P⁺区、N⁺区杂质浓度 cm⁻³

D ——大注入时的双极扩散系数 cm²/s

q ——电子(空穴)电荷量,

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

k ——玻耳兹曼常数,

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

T ——绝对温度 K

从公式(32-2-1)可知,为降低 U_J ,必须减小 N_{p^+}, N_{n^+} 及 W_{p^+}, W_{n^+} ,但这又将导致体压降及接触压降增大。因此,必须与体压降和接触压降统筹考虑。

b. 体压降 体压降是在硅片上的电压降,它取决于硅片的厚度、电阻率等。但在具有良好的电导调制作用时,体压降 U_w 不受硅片原始电阻率限制,可近似地由下式表示:

$$U_w = \frac{(W_p + W_n)^2}{\mu} \left(\frac{j}{2q\tau} \right)^{1/2} \times \left[\frac{1}{(W_{p^+} N_{p^+})^{1/2} + (W_{n^+} N_{n^+})^{1/2}} \right] \quad \text{V} \quad (32-2-2)$$

式中 μ ——大注入时的载流子迁移率 cm²/V·s

W_p, W_n ——P区(P基区)、N区(N基区)的宽度 μ

τ ——少子寿命 μs

从公式(32-2-2)可知, U_w 正比于 $(W_p + W_n)^2 \times j^{1/2}$ 。对P、N基区较宽的高压管,在大电流密度下,体压降较大;在过载条件下, τ, μ 均下降,使 U_w 增加更快。另一方面,为具有良好的电导调制作用,