

高等学校教材

半导体器件

——电力、敏感、光子、微波器件

刘刚 余岳辉 史济群 编著

电子工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了电力、敏感、光子、微波半导体器件四方面、约三十余种器件的工作原理、结构、设计方法、特性及应用。内容深入浅出、简明扼要、即广泛又具体，同时反映了上述器件近年来的最新成果和世界范围内的水平。

本书是为高等院校理工科半导体专业的本科生、研究生编写的教材，也可供应用上述器件专业的学生、从事器件研究、制作、应用的有关人员参考。

半 导 体 器 件

——电力、敏感、光子、微波器件

刘 刚 余岳辉 史济群 编著

责任编辑：陈晓莉

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京燕山印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：17.75 字数：465千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

印数：1—1500册 定价：3.70元

ISBN 7-5053-0865-3/TN·306

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书经《电子材料与固体器件》教材编审委员会《半导体物理与器件》编审小组评选审定，并推荐出版。作为高等工科电子类半导体器件专业统编教材。

该书的编写旨在拓宽学生的专业口径，扩大其知识面，以更好地适应学科的发展及大范围工作的需要。全书包括电力半导体器件、半导体敏感器件、半导体光子器件、微波半导体器件共四方面的内容。授完全部课程，约需60学时。但各院校可根据实际需要，灵活处理。可用较少的学时任选其中的一篇或几篇，或一篇中的数章。由于书中所涉及的内容非常广泛，而篇幅又十分有限，故本书的重点在阐明各种器件的基本原理，其次在论述器件的基本特性，有选择地例举典型器件的实际结构、设计方法、工艺过程及其具体数据；并尽可能反映半导体学科近几年来在这四方面所取得的最新成果，以力求使教材具有简明、扼要、具体、新颖的特点。编写方法上尽可能做到深入浅出、便于学生自学。

该书可作为半导体专业本科生的学习用书，也可供电子线路、仪表、通信、微波等专业的学生、研究生、以及从事上述各器件的研究、制作、应用等工作的有关人员参考。

本书由李卫教授主审，感谢他为本书所提的宝贵意见。在编写过程中，还得到王敬义教授、白祖林付教授的指导，在此一并表示谢意。

本书由刘刚主编。其中第一篇由余岳辉编写，第三篇由史济群和马稚尧编写，第二篇和第四篇由刘刚编写。该书虽经试用、修改，但因时间仓促，加之编者水平有限，书中难免存在一些缺点，甚至错误，敬请使用本书的广大读者不吝赐教。

编者 1989.5

目 录

第一篇 电力半导体器件 1	
第一章 电力半导体器件概述 1	
1.1 电力电子学与电力半导体..... 1	
1.2 电力半导体器件的分类..... 2	
1.3 电力器件的基本应用..... 3	
第二章 晶 闸 管 5	
2.1 晶闸管的基本结构、等效电路及特性..... 5	
2.2 晶闸管的工作原理..... 6	
一、 <i>pnpn</i> 器件的导通物理过程..... 6	
二、晶闸管的导通机理..... 7	
三、触发机构..... 8	
2.3 阻断模式..... 9	
一、雪崩击穿与穿通效应..... 9	
二、晶闸管的最佳反向阻断电压..... 11	
三、晶闸管的正向阻断电压..... 13	
四、晶闸管的最小长基区宽度 W_{min} 15	
2.4 表面成型技术..... 17	
一、半导体表面理论的几种基本观点..... 17	
二、正斜角、负斜角及电场分布..... 18	
三、电力器件的表面成型..... 20	
2.5 门极特性..... 21	
一、门极模型..... 21	
二、晶闸管的短基区宽度..... 22	
2.6 通态特性及功率损耗..... 23	
一、正向传导模式..... 23	
二、晶闸管的通态电压..... 23	
三、晶闸管的功耗及热学设计..... 28	
2.7 动态特性..... 31	
一、开通特性..... 31	
二、 $\frac{di}{dt}$ 耐量..... 34	
三、 $\frac{dv}{dt}$ 效应..... 37	
四、关断过程..... 39	
第三章 特殊型晶闸管 43	
3.1 双向晶闸管..... 43	
一、双向晶闸管的基本结构及特性..... 43	
二、触发方式及其原理..... 43	
三、双向晶闸管的有关特性..... 45	
3.2 逆导晶闸管..... 45	
一、逆导晶闸管的结构及特点..... 46	
二、逆导晶闸管的工作原理及换流特性..... 47	
三、改善换流特性的措施..... 47	
3.3 光控晶闸管..... 47	
一、概述..... 47	
二、光控晶闸管的工作原理..... 48	
三、光触发灵敏度及光敏区结构..... 50	
四、LTT的光源..... 54	
3.4 GTO..... 55	
一、概述..... 55	
二、GTO的工作原理..... 56	
三、GTO的结构..... 60	
3.5 场控器件..... 61	
一、场控晶闸管 (FCT)..... 61	
二、MOS栅晶闸管..... 62	
参考文献 63	
习题一 64	
第二篇 半导体敏感器件 66	
第四章 敏感器件概论 66	
4.1 传感器及其分类..... 66	
4.2 敏感器件材料..... 69	
一、半导体材料的敏感特性..... 69	
二、非晶硅半导体..... 70	
三、金属氧化物半导体..... 72	
四、传感器用光纤材料..... 73	
4.3 敏感器件的研究方向..... 74	
第五章 半导体温敏器件 76	
5.1 温度传感器的发展..... 76	
5.2 半导体热敏电阻..... 77	
一、氧化物半导体热敏电阻..... 77	
二、锗、硅单晶热敏电阻..... 79	
三、SiC热敏电阻..... 81	
5.3 <i>pn</i> 结及晶体管温敏器件..... 81	

一、 pn 结正向电压的温度特性	82	第八章 半导体离子敏感器件	114
二、晶体管温度敏感器	82	8.1 ISFET的特点与应用	114
三、SiC pn 结温度敏感器件	83	8.2 基本工作原理	114
5.4 集成温度传感器	84	8.3 ISFET的设计和工艺	117
一、主要类型及感温原理	84	一、FET的设计特点	117
二、电压型集成温度传感器	84	二、离子敏感膜的类型和制备	118
三、电流型集成温度传感器	85	8.4 ISFET的特性和参数	119
四、CMOS集成温度传感器	86	8.5 生物膜敏感器件	122
第六章 半导体力敏器件	87	8.6 多功能集成ISFET	123
6.1 力学量和力敏器件	87	第九章 半导体湿敏器件	125
6.2 半导体压阻效应	87	9.1 湿度与湿敏器件	125
一、压阻效应	87	9.2 湿敏器件的基本特性	126
二、应变灵敏度	88	9.3 氧化物半导体湿敏器件	127
三、压阻系数	89	9.4 氧化铝湿敏器件	130
6.3 电阻式硅膜片压力敏感器件	90	一、 Al_2O_3 湿敏器件的结构和工艺	130
一、电桥原理	90	二、多孔 Al_2O_3 膜的感湿机理	131
二、膜片形状及电阻配置	91	三、湿敏特性	131
三、材料的导电类型及晶向	93	9.5 MOS湿敏器件及集成化	132
四、芯片尺寸	94	第十章 半导体气敏器件	134
五、力敏电阻的设计	94	10.1 气敏器件的类型和应用	134
6.4 压敏二极管及压敏晶体管	95	10.2 氧化物半导体气敏器件	136
一、压敏二极管	95	一、敏感机理	136
二、压敏晶体管	96	二、特性及影响因素	137
三、压电场效应晶体管 (PI-MOSFET)	96	10.3 半导体气敏二极管	139
四、J-FET力敏器件	96	10.4 MOSFET气敏器件及多功能	140
6.5 集成压力传感器	97	集成气敏器件	140
第七章 半导体磁敏器件	100	一、 H_2 敏MOSFET	140
7.1 霍尔器件	100	二、CO敏MOSFET	142
一、霍尔效应	100	三、气敏器件的多功能化、集成化	143
二、霍尔器件的结构和工艺	102	参考文献	144
三、参数与特性	103	习题二	146
四、霍尔器件的设计考虑	104	第三篇 半导体光子器件	148
7.2 磁阻器件	105	第十一章 半导体太阳能电池	148
一、磁阻效应	105	11.1 半导体太阳能电池的光生伏特效应	149
二、设计与制作	106	一、光伏效应的两个基本条件	149
7.3 磁敏二极管	107	二、等效电路、伏安特性及输出特性	151
一、工作原理及结构尺寸	108	11.2 太阳能电池的光电转换效率	153
二、基本特性	109	一、太阳辐射光谱AM0和AM1.5	153
7.4 磁敏晶体管	110	二、太阳电池的理论效率	154
一、长基区磁敏三极管	110	三、影响太阳电池效率的一些因素	155
二、磁敏MOSFET	111		
7.5 磁敏集成电路	112		

11.3 高效率太阳能电池的发展	163	一、可见光发光二极管	205
一、高效率硅太阳能电池的发展	164	二、红外上转换发光管	208
二、高效、长寿命砷化镓太阳电池	166	三、红外发光二极管	209
11.4 低成本太阳能电池	166	14.3 半导体激光器	210
一、太阳能电池级硅 (SO ₂ -Si)	167	一、半导体激光器特点及材料	210
二、多晶硅太阳电池	168	二、半导体受激光发射	212
三、非晶硅太阳电池	168	三、不同结构的半导体激光器	214
第十二章 半导体光电探测器	171	参考文献	216
12.1 概述	171	习题三	218
12.2 光敏电阻	172	第四篇 微波半导体器件	219
一、结构、原理及参数	172	第十五章 变容二极管及阶跃二极管	222
二、主要光敏电阻的分类、用途	176	15.1 变容二极管基本工作原理	222
12.3 光敏二极管	180	15.2 变容二极管主要参数	224
一、光敏二极管的特点	180	15.3 变容二极管结构和工艺	225
二、耗尽层光敏二极管	181	15.4 调谐变容二极管	226
三、雪崩光敏二极管	185	15.5 阶跃恢复二极管	227
12.4 光伏控制器件	189	第十六章 pin二极管	229
一、双极型光敏晶体管	189	16.1 结构及工艺	229
二、光敏场效应晶体管	190	16.2 基本工作原理	230
第十三章 CCD摄像传感器件	192	16.3 特性与参数	231
13.1 概述	192	第十七章 雪崩渡越时间二极管	234
13.2 CCD摄像器件的作用及工作方式	192	17.1 崩越二极管基本工作原理	234
13.3 工作的物理基础	193	一、饱和漂移速度	234
一、光电转换——信息电荷“图象”	193	二、负阻效应	235
二、电荷存储	193	三、崩越二极管振荡机理	235
三、电荷转移、转移效率及频率	195	17.2 结构与工艺	237
13.4 分类、用途、结构及工作原理	199	17.3 主要参数	239
一、分类与用途	199	17.4 势越二极管和速越二极管	240
二、帧传输CCD面型摄像器件的结构	199	第十八章 肖特基势垒二极管	243
三、工作过程	200	18.1 肖特基势垒	243
第十四章 发光二极管和半导体激光器	201	18.2 伏安特性	244
14.1 pn结注入式场致发光原理	201	18.3 等效电路和参数	246
一、激发	202	18.4 结构和工艺	247
二、复合	202	第十九章 转移电子器件	250
14.2 发光二极管	205	19.1 转移电子效应	250
		19.2 高场畴	252
		19.3 基本工作模式	254
		19.4 限累二极管	256
		19.5 结构、工艺及特性	257
		第二十章 微波晶体管	259
		20.1 微波晶体管的S参量	259
		20.2 硅微波双极晶体管	261

20.3 异质结微波双极晶体管..... 264
20.4 砷化镓场效应微波晶体管..... 265
20.5 高电子迁移率晶体管..... 269
 一、基本工作原理..... 270

 二、特性..... 272
 三、结构和工艺..... 273
参考文献..... 275
习题四..... 275

第一篇 电力半导体器件

在不考虑几何尺寸时，电力半导体器件物理和已学过的小功率半导体器件物理完全相同。器件工作原理也相同，但在大功率工作条件下，器件物理的许多方面都存在着很大差异。

数字集成电路的材料电阻率为 $0.15 \sim 0.2 \Omega \cdot \text{cm}$ ，而 pin 二极管和 pnpn 一类四层结构器件所选用的材料其电阻率在几十到几百欧姆厘米，且通态电流高达几百安培至几千安培，阻断电压达几千乃至上万伏。工作在开关状态，少子寿命控制技术，散热问题等必须有与之适应的特殊工艺；在浪涌状态下，电流密度达 $1000 \sim 3000 \text{A}/\text{cm}^2$ ，注入载流子浓度超过半导体中热离化的原始载流子浓度，因而在决定器件性能方面，半导体的本底浓度变得不那么重要，而且总的电子和空穴浓度近似相等，高电平注入分担着注入本征材料的许多共同特性，所以宜对低掺杂半导体中的输运现象给予特殊的考虑。表面成型技术是以前很少接触过的；电流上升率、 $\frac{di}{dt}$ 和电压上升率 $\frac{dv}{dt}$ 等动态特性有其特殊要求。本篇将以晶闸管为主，介绍电力器件家族中基本器件的原理和特性。同时简单介绍几种特殊型晶闸管。

第一章 电力半导体器件概述

1.1 电力电子学与电力半导体

四十年前，硒整流器的出现比起闸流管、引燃管、氧化铜整流器是一大进步。虽然早在1940年就已使用着点接触二极管，但具有划时代意义的是1947年和1949年贝尔实验室先后开发了点接触晶体管和结型晶体管^[1]。之后，通过无数工艺的不断变革，对器件模型的深入了解以及对材料的研究，开发出了今天的集成电路和电力电子器件，并形成了以集成电路为主体的微电子学科和以晶闸管为主体的电力电子学科。IEC称电力电子学为“以电力技术为对象的电子学”。

1974年，国际上接受了Newell的定义，把电力电子学定为介于电力、电子、控制三者的边缘学科^[2]。

1952年，Hall论证了第一只Ge合金结台面二极管(35A/200V)的电特性，并利用当时新近发展的产生、复合理论模型，成功地解释了二极管和晶体管的电特性。五十年代中期，电力器件的重点在于发展单晶硅技术，由于硅有较大的能隙宽度，可以制成高反压和较高结温的二极管。五十年代后期，500V合金结二极管开始商品化，并发展了扩散结、台面技术，之后几年反向电压提高到了几千伏。六十年代中期，提出了雪崩电压9kV的表面造型理论，并通过对减小热应力、机械应力的研究，提高了电流容量，发展到现在直径

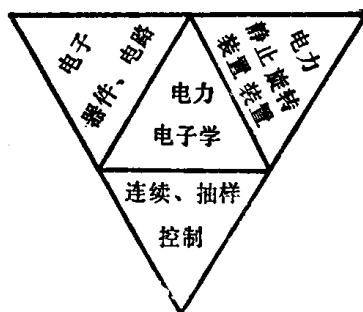


图 1-1 电力电子学的定义

φ77mm, 电流5000A, 反向电压3kV的整流二极管。

与此同时, 继1952年 J·Ebers 研究了 *pnpn* 等效电路之后, 1956 年贝尔实验室 Moll 等人提出了 *pnpn* 晶体管开关, 并在 IRE 上发表了有关论文, 该论文后来成为研究 *pnpn* 器件的基石。Moll 等人的论文发表后, General Electric Co. 的工程师们很快认识到它的重要性, 这种开关不单可作信号用元件, 还可用于功率转换、控制等。九个月以后即 1957 年, GE 公司宣布第一只工业用的可控硅元件制成, 当时取名为 SCR, 实际上是晶体管的衍生物, 是电力器件家族中的基础器件, 国际上统称为晶闸管 (Thyristor)。

晶闸管生产中不断进行工艺改革和结构改进, 为新器件的不断出现提供了条件。1961 年开发了早期的可关断晶闸管, 它兼有晶体管的开关特性, 又具有晶闸管的低导通损耗。1964 年 GE 公司开发了双向晶闸管, 当时主要用于调光和马达控制。1965 年出现了小功率光触发晶闸管, 为以后出现的固态继电器打下了基础。六十年代后期, 出现了大功率 20kHz 的逆变晶闸管。1974 年开发了逆导晶闸管和非对称晶闸管。七十年代中期, 晶闸管设计集成化, 出现了场控晶闸管。七十年代末, 200A、500V 双极达林顿研制成功并投入生产, 同时将 MOS 技术引入到电力器件上, 开发了大电流密度、高输入阻抗的 MOS 器件。而且由于微电子学与电力电子学的一体化前进, IC 技术引入到电力器件上, 使大电流 GTO、光控 GTR 等器件获飞速发展, 成为八十年代引人注目的一类器件之一。

随着 MOS-FET 的发展, 出现了八十年代另一类引人注目的高智能化器件——单片高压集成电路 (HVIC), 它是将电力器件和信号电路集成在同一芯片上, 最初主要用于电信、电源、显示系统, 最近应用到电力电路。随着发展, HVIC 的容量和集成度将增加, 包括带有相当敏感和有高输出功率、高压器件的逻辑电路, 模拟电路。本世纪末可望超过 20A 以上。

1.2 电力半导体器件的分类

电力半导体器件门类繁多, 计 40 余种。其分类方法随分类原则的不同而不同。可按极数、极型、结构组合型式、触发或关断方式、应用方式来分类。表 1-1 是常用的典型器件数分类表:

表 1-1 常用器件分类

不可控器件	普通型		普通二极管
	快速型		快恢复二极管
			肖特基二极管
可控制器件	换流关断型	双极	晶闸管
			相控晶闸管 (P.C.T)
			逆变晶闸管 (I.T)
			非对称晶闸管 (ASCR)
			逆导晶闸管 (RCT)
			门极辅助关断晶闸管 (GATT)
			光控晶闸管 (LTT)
双向晶闸管 (BCT)			

可控制器件	自关断型	双极	GTO	门极可关断晶闸管
			GTR	单一型
			MOS型	达林顿型
		MOS	MOS双极混合	MOS-FET
			MOS 双极 功能集成	场控晶闸管(FCT)
				绝缘栅晶体管(IGT)
				MOS栅晶闸管(MGT)
高压集成电路(HVIC)				
组合型器件	功率模块 (Power Modules) 组件 (Stacks)			

1.3 电力器件的基本应用*

晶闸管是最早打开强电领域大门的半导体器件，其基本应用是相位控制，即通过触发时间的选择可以调节负载上的平均功率，如图 1-2 所示。由于晶闸管可以用小的门极电流开通高达兆瓦级的巨大功率，具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用寿命长、可靠性高等优点，已广泛用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等工业部门和日常生活中家用电器设备控制系统，是节能最有效的器件之一。

基本应用电路有以下几种类型⁽³⁾：

(1) 开关电路。电力器件如二极管、晶闸管、功率晶体管等本身就是一个理想的开关元件，用它们组成的静态开关是无触点的，在通断电流时不会产生电弧，因此可以消除由此而产生的干扰，不需要经常维修。常用的有交流开关、直流开关。这里需要先指出的是，晶闸管正向连接时一旦在门极加正的信号便导通，但是导通后实现关断就很困难了。在直流电路中，晶闸管导通后即使去掉门极信号，仍然会维持导通状态。要实现关断，常用的方法是：切断阳极电流或使它减小到维持电流以下；在阳极和阴极间加一反向电压，使阳极电流换向；用负的门极电流来帮助阳极电流换向。图 1-3 为晶闸管直流开关基本电路，采用由电容 C 构成的换向关断电路，以辅助晶闸管 T_2 来关断主晶闸管 T_1 。当 R 足够大时， $R-T_2$ 支路电流小于维持电流 I_H ， T_1 关断后 T_2 自行关断。

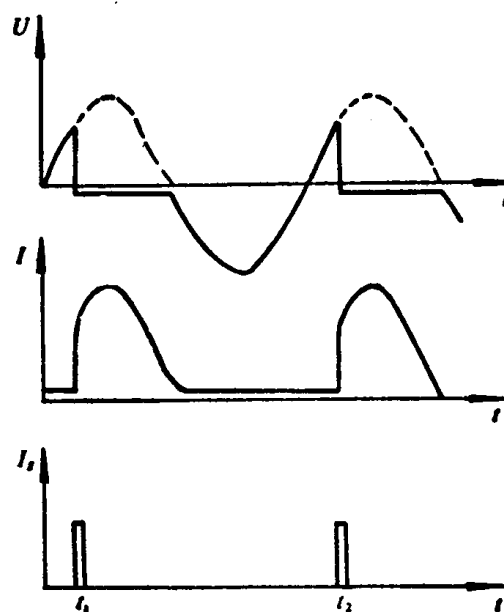


图 1-2 晶闸管的相位控制

图 1-2 晶闸管的相位控制

* 本节作为选修，也可以在学完第二、第三章后再读。

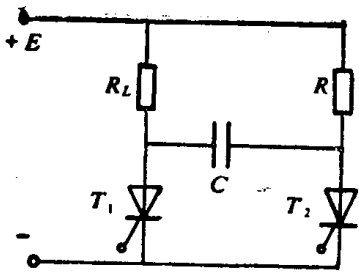


图 1-3 晶闸管直流开关原理电路

(2) 整流电路。这是最广泛的电力半导体电路。它是利用相位可控的触发脉冲加于晶闸管门极上, 改变晶闸管的工作状态, 从而由交流得到可调的直流电压, 以用于输电、牵引、传动、电化学电源、核融合电源、焊接以及家用电器中调速、调光等。它可分为单相、三相和多相整流电路。其输出的直流平均电压、直流平均电流与输入的交流有效值电压、交流有效值电流以及晶闸管延迟角 α 、负载的电压电流波形之间随接线形式不同有着复杂的数量关系。

(3) 逆变电路。与整流电路相反, 是将直流电压变为交流电压。可分为有源逆变和无源逆变电路两种, 前者是交流输出与交流电网相连, 即将直流变为与电网同频率的交流。后者是交流输出直接与负载相连, 由直流能量变换为交流能量, 直接供给负载。这种将直流电变为不同电压和频率的交流电的装置称逆变器或直交变频器。也可去掉直流环节, 由相位控制组成相控变频电路直接变频, 亦称交交变频。图1-4所示为一简单的高频逆变器原理图, 频率可达 $20 \sim 30 \text{kHz/s}$, 适用于感应加热、声纳、无线电发射机以及高频直流-直流变换器。

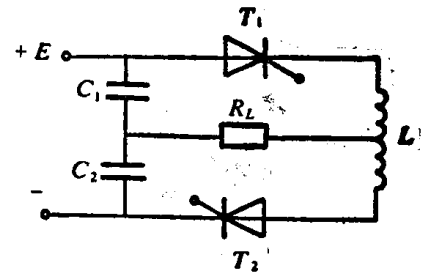


图 1-4 简单的高频逆变器原理电路

(4) 直流斩波电路与交流调压电路。它是利用一个或几个晶闸管或晶体管作为无触点开关, 接于电源与负载之间, 使输出波形是电源波形的一部分, 从而得到可调的负载电压。通常晶闸管接在直流电源与负载之间, 用以改变加到负载上的平均电压的称为直流斩波电路, 而接在交流电源与负载之间, 用以改变负载所得的交流有效值电压的称为交流调压电路。图 1-5 为可调输出脉冲电压宽度的直流斩波器, 其工作原理是: 电路接通电源 E 后通过 R_L-L-D_2 对 C 充电, 在 $t = t_1$ 时刻, 触发 T_1 , 负载电流通过负载 R_L ; 在 $t = t_2$ 时触发 T_2 , C 通过 L 谐振放电对 C 反充电, 直到 T_2-L-C 回路电流小于 I_H 时 T_2 关断, 此后 C 上反充电电压经 D_2 加到 T_1 使 T_1 关断, 恢复到原始状态, 整个过程重复进行可给 R_L 连续输出直流脉冲电压。图中 D_1 、 T_1 由逆导晶闸管代替可大大简化电路并改进其性能。最简单的交流调压可以由反并联晶闸管实现, 也可采用双向晶闸管或晶闸管模块, 有利于进一步缩小装置体积。

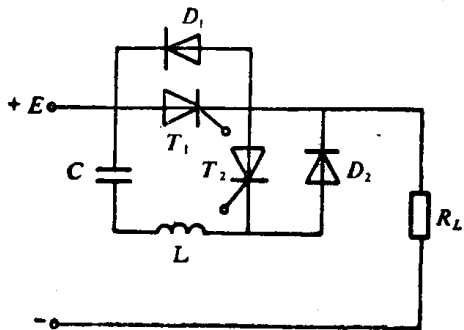


图 1-5 直流斩波器原理电路

这个过程重复进行可给 R_L 连续输出直流脉冲电压。图中 D_1 、 T_1 由逆导晶闸管代替可大大简化电路并改进其性能。最简单的交流调压可以由反并联晶闸管实现, 也可采用双向晶闸管或晶闸管模块, 有利于进一步缩小装置体积。

第二章 晶 闸 管

晶闸管是具有 $pnpn$ 结构双稳半导体器件的总称。在它们工作时，器件显示出固有的再生作用，可作开关使用。当处于阻断状态时，可以承受低反向电流下的高电压，而处于正向传导时，它们在低压降下能传导大电流。靠这些特性，这类器件能控制强大的功率。基本的晶闸管是四层 $pnpn$ 结构，但近十多年来又发展了许多派生结构。为适应电路的需要，有些是把分流二极管组合到基本结构上去，有些则是通过改变基本图形或结构、工艺获得关断能力或双向器件的特点，有些则是改变它的触发方式而形成一种新器件。它们均有许多共同之处，本章主要介绍以普通晶闸管为基本内容的四层三端结构及晶闸管物理。

2.1 晶闸管的基本结构、等效电路及特性

晶闸管具有如图2-1 (a)所示四层三端结构，三个 pn 结分别由 J_1 、 J_2 、 J_3 结表示。(b)为代表符号。其等效电路如图2-2所示。 α_1 表示 pnp 晶体管的电流放大系数， α_2 表示 npn 晶体管的电流放大系数。 α_1 、 α_2 分别描述了 J_1 结和 J_3 结对 J_2 结的作用。

各层掺杂浓度分布如图2-3示。其中 n_1 为衬底浓度，它由原始单晶材料决定，为均匀掺杂。 p_1 、 p_2 区由硼铝涂层扩

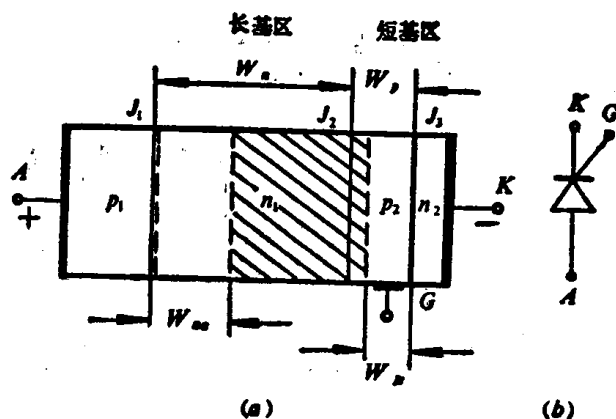


图 2-1 晶闸管结构、符号

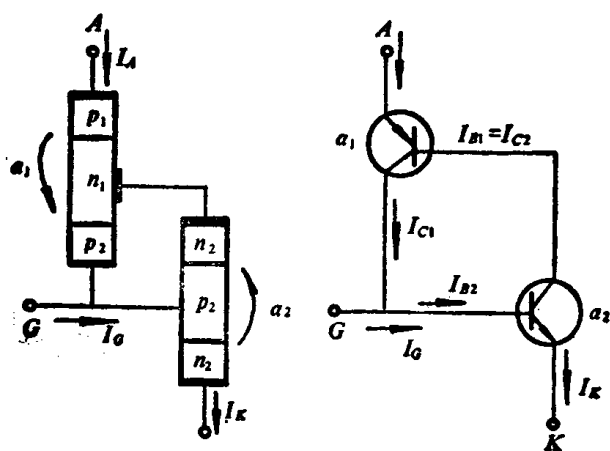


图 2-2 晶闸管的等效电路

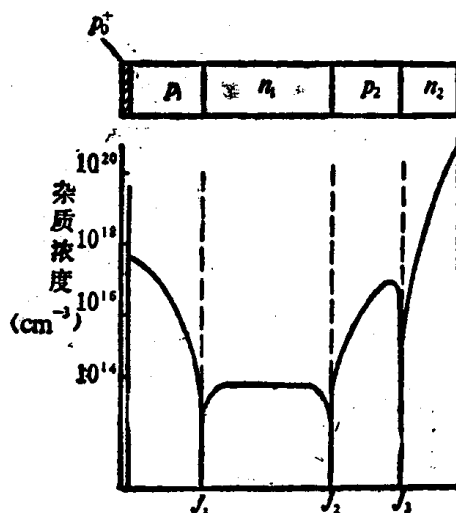


图 2-3 掺杂剖面分布

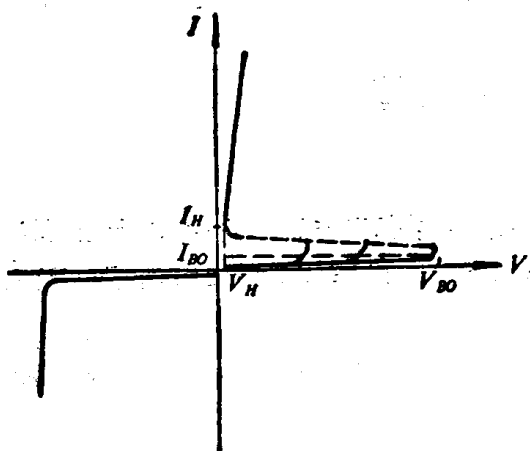


图 2-4 晶闸管的电流电压特性

所示,随着 I_g 的增大, V_{B0} 下降。 I_g 通常在几毫安至几百毫安范围,所以说晶闸管是用小信号控制强大功率的“可控”器件。当反向连接时(p_1 区接负),门极不起作用,其伏安特性与二极管反向特性相似。需要指出的是,晶闸管一旦导通之后,即使把门极信号去掉,器件仍维持导通状态,只有当正向电流降到维持电流 I_H 之下时才会关断。为了改善晶闸管的静态,动态特性,通常还采用 n_2 区和 p_2 区局部短路的短路发射极结构,放大门极结构等,后面将一一讨论。

散或真空闭管扩镓形成,其浓度一般在 $10^{16} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 范围。 n_2 区由合金法或磷扩散形成,其浓度为 10^{20}cm^{-3} 以上, p_0^+ 是为获得欧姆接触而进行的重掺杂区。其电流电压特性如图2-4所示。当正向连接(p_1 区接正),门极开路($I_g = 0$)时,称器件处于断态模式。此时只要外加电压小于转折电压 V_{B0} ,整个器件上只有微小的正向漏电流流过,如伏安曲线上 $I_g = 0$ 的曲线所示。当外加电压进一步升高时, J_2 结击穿,电流急剧上升,此时器件可以流过大的正向电流,器件两端的压降降至一很小的值,处于传导模式。如果在门极加一相对阴极为正的信号,则器件伏安特性如图2-4中 $I_g \neq 0$ 的曲线

2.2 晶闸管的工作原理

一、 $pnpn$ 器件的导通物理过程

正向偏置的 $pnpn$ 四层两端器件具有如下特点:①具有通态和断态两个稳定状态;②有负阻现象。可划分为下述几个区域^[4]:断态区、 $I = 0 \sim I_{B0}$ 的区域;转折区, $\frac{dv}{dt} = 0$,该点对应转折电压 V_{B0} ;负阻区,即 $I_{B0} \sim I_H$ 的区域;通态区, $I > I_H$ 的区域;反向阻断区和反向击穿区。

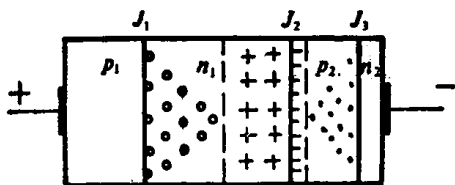


图 2-5 正向偏置下载流子分布

断态区:当外加正向电压较小($V \ll J_2$ 结雪崩电压), J_1 、 J_3 结处于正向偏置, p_1 区向 n_1 区注入空穴,同时 n_2 区也向 p_2 区注入电子,彼此靠复合与补充维持电中性。因 J_2 结处于反向,只有小的电流流过 J_2 结,类似二极管的反向特性。

雪崩区:当外加电压上升到接近 J_2 结的击穿电压 V_B 时,处于反偏的 J_2 结空间电荷区内电场变得很大,引起雪崩倍增发生。这时反向产生电流通过势垒区由碰撞电离而增加 M 倍。倍增因子 M 与电压的关系为

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n} \quad (2-1)$$

式中 n 为密勒指数,对功率器件,一般取 $n = 6$ 。可见当外加电压 V 较小时, $M \rightarrow 1$;当 $V \rightarrow V_B$ 时, M 急剧增加,通过 J_2 结的电流由原来的反向电流转变为由 J_1 、 J_3 结注入的载流

子经过基区后衰减而又在势垒区倍增了的电流。一般来讲，当电流放大系数与雪崩倍增因子的积等于1时，所对应的外加电压即为转折电压 V_{B0} 。

负阻区：当外加电压大于转折电压时，势垒区内雪崩倍增产生大量的电子空穴对，这些载流子受反向电场的抽取作用，电子进入 n_1 区，空穴进入 p_2 区。由于不能很快复合，将使 J_2 结两侧产生载流子积累，即 p_2 区有空穴积累， n_1 区有电子积累以补偿离化的杂质，使空间电荷区变薄。 p_2 区电位升高， n_1 区电位下降。降落在 J_2 结上的电压减小，雪崩倍增减弱， J_1 、 J_3 结的注入增强，从而出现电压减小、电流增强的负阻现象。

通态区：由于上述积累增加， J_2 结电压下降直至 $M = 1$ 雪崩倍增停止时，仍能维持使 p_2 区相对 n_1 区为正， J_2 结倒向，三个结均处于正向，有类似二极管的正向特性。

反向阻断区：反向电压由 J_1 结承担，与单个 pn 结反向特性相似。当反向电压增大至 J_1 结发生雪崩效应，但到达 p_1 区的空穴也只与阳极的电子复合，因此不会产生正向特性中的正反馈作用，故不出现负阻区。

二、晶闸管的导通机理

将晶闸管看成为两个晶体管的组合，由图2-2等效电路可知， pnp 晶体管的基极电流为

$$I_{B1} = (1 - \alpha_1)I_A - I_{CB01} \quad (2-2)$$

npn 晶体管的集电极电流为

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CB02} \quad (2-3)$$

因为

$$I_K = I_A + I_G \quad (2-4)$$

且 $I_{B1} = I_{C2}$ ，解(2-2)式与(2-3)式得

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{C0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2-5)$$

式中 $I_{C0} = I_{CB01} + I_{CB02}$ ，表示 $n_1 p_2$ 二极管即 J_2 结的反向漏电流。(2-5)式是不考虑空穴、电子的雪崩倍增因子，没有短路发射极时晶闸管转折条件的表达式。可以证明⁽⁵⁾

$$\frac{dI_A}{dI_G} = \frac{\alpha_2}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2-6)$$

在 $\frac{dV}{dI} = 0$ 的击穿点，当 $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ ，则 $\frac{dI_A}{dI_G} \rightarrow \infty$ ，器件开通。所以

$$\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1 \quad (2-7)$$

称晶闸管的开通条件。考虑到倍增因子，令 $M_p = M_n = M$ ，则开通条件表示为

$$M(\alpha_1 + \alpha_2) \geq 1 \quad (2-8)$$

当有短路发射极时，因 $\alpha_2 \approx 0$ ，所以(2-8)式变为

$$M\alpha_1 \geq 1 \quad (2-9)$$

图2-6表示晶闸管断态时载流子运动情况。由图可知，当 $p_1 n_1 p_2$ 晶体管的集电极电流

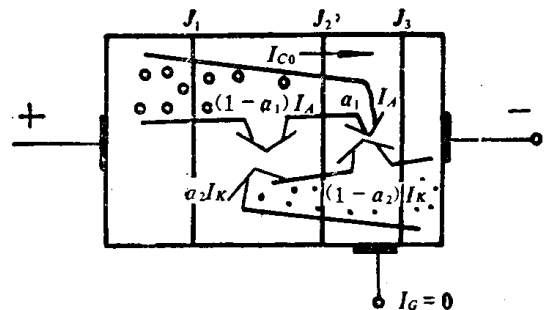


图 2-6 正偏下载流子运动示意图

$\alpha_1 I_A$ 大于 $n_1 p_2 n_2$ 晶体管的基极电流 $(1 - \alpha_2) I_K$ 时, p_2 区相对 n_1 区为正, 有空穴积累, 即

$$\alpha_1 I_A > (1 - \alpha_2) I_K \quad (2-10)$$

$I_G = 0$ 时有 $I_A = I_K$, 同样得到 $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$ 的开通条件。

三、触 发 机 构

(2-5) 式表明, 增大 I_G 或 I_{C0} 以及 α_1 、 α_2 都将使 I_A 迅速增加, 实现晶闸管开通。

电流放大系数随电流而变化。在 $n_1 p_2 n_2$ 晶体管中, 电流放大系数 α 为注入系数 γ 与运输系数 β 的积。

$$\alpha = \gamma \cdot \beta \quad (2-11)$$

通过发射结的电流由注入电流、复合电流和表面漏电流三部分组成。当 J_3 结偏压很低, 通过阴极的电流很小, 上述第二、三部分的电流是主要的。随着 J_1 结偏压增大, 注入电流按 $e^{qV/kT}$ 指数增加, 而复合电流则是按 $e^{qV/2kT}$ 增加的, J_3 结的电流主要是注入电流, 发射效率随电流的增加而变大, 所以 α 随电流而增加。当进一步增大注入电流, p_2 区空穴浓度增加, 注入比下降, 而且由于载流子散射作用, 使到达 J_2 结的空穴数减少, 即运输系数 β_2 减小, 故电流放大系数下降。图 2-7 中示出了 α 随

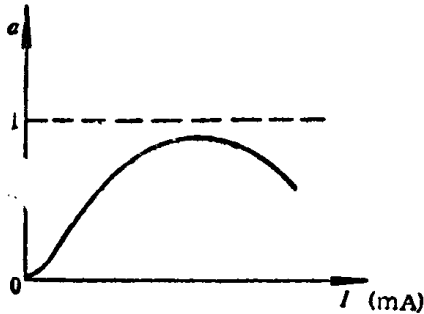


图 2-7 α 随电流的变化

电流变化的大致三个阶段。

α 还随温度而变化, 图 2-8 表示 α_1 、 α_2 随温度变化的曲线⁽⁶⁾。随着温度升高, 扩散电流增长的速度、少子寿命均增加, 使 γ 、 β 增加, 故 α 上升。上述分析表明, 四层三端器件的开通可以用各种使 α 增大的方法来实现, 大致归纳为:

(1) 门极电流触发。当门极相对阴极接正的信号, 有 I_G 流过 J_3 结, J_2 结电流随 I_G 的增大而增大, 促使 α_1 、 α_2 增大, 晶闸管导通。同理当

门极相对阴极接负的信号, 由门极引入反向电流排除阴极-门极区过剩空穴, 以辅助关断或关断晶闸管。

(2) 热触发。晶闸管正向连接时外加电压主要由 J_2 结承担, 流过的电流为 I_{C0} , 当 $I_G = 0$ 时

$$I_A = \frac{I_{C0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2-12)$$

将上式对 I_{C0} 求微商得

$$\frac{dI_A}{dI_{C0}} = \frac{1}{1 - (\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2)} \quad (2-13)$$

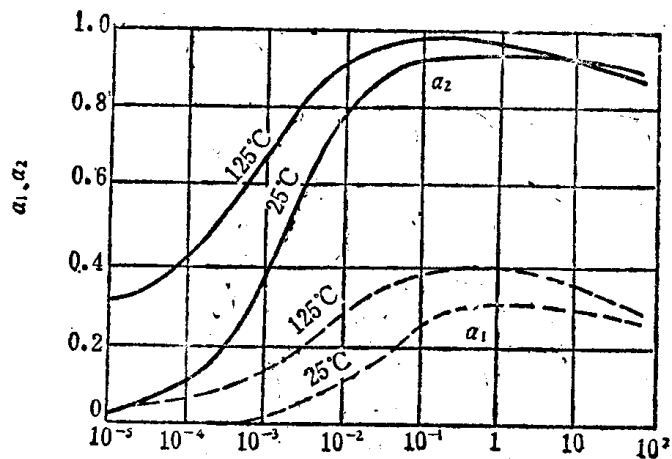


图 2-8 α 随温度的变化

表明当小信号 α 之和为1时, 温度的微小增加会导致 I_A 无限增大。

(3) 阳极电压触发。随着外加正向电压的提高, J_2 结雪崩倍增, $M \gg 1$, 由

$$I = \frac{M I_{C_0}}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2-14)$$

α 随 M 而增大, 出现转折导通。

(4) $\frac{dv}{dt}$ 触发。当一个迅速上升的电压加到晶闸管上, 随着 J_2 结电压 V_{J_2} 的变化, 在 J_2 结电容 C_{J_2} 上产生位移电流如图2-9所示。

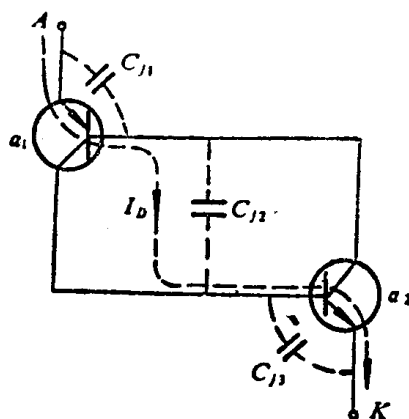


图 2-9 通过 J_2 结的位移电流

$$I_D = V_{J_2} \frac{dC_{J_2}}{dt} + C_{J_2} \frac{dV_{J_2}}{dt} \quad (2-15)$$

因 J_1 、 J_3 结处于正偏, 图中 C_{J_1} 、 C_{J_3} 远小于 C_{J_2} , 上式中第一项可以忽略, 所以有

$$I_D = C_{J_2} \frac{dv}{dt} \quad (2-16)$$

当 $\frac{dv}{dt}$ 较大, J_2 结两侧被拉走的载流子速率大增, 有大的 I_D 通过 J_1 、 J_3 结, 分别引起 J_1 结向 n_1 区注入空穴, J_3 结向 p_2 区注入大量电子, 如同加上了门极电流一样将使器件开通。

位移电流通过 J_2 结时, 阳极电流 $I_A(t)$ 为

$$I_A(t) = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_D + I_{C_0} \quad (2-17)$$

不考虑 I_{C_0} , 则当 $I_G = 0$ 时

$$I_A = \frac{I_D}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2-18)$$

同样可以得到

$$\frac{dI_A}{dI_D} = \frac{1}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2-19)$$

上式表明, 当 $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$, $\frac{dI_A}{dI_D}$ 变得很大, 器件转折导通。

(5) 光触发。利用适当波长的光(对Si而言, $\lambda = 0.9 \sim 1.1 \mu\text{m}$)注入到半导体内, 在 J_2 结耗尽区和 n_1 区、 p_2 区靠 J_2 结一侧的一个扩散长度范围内产生电子空穴对, 形成作为门极电流的光电流, 实现 $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$ (详见第三章)。

2.3 阻断模式

一、雪崩击穿与穿通效应

1. 雪崩击穿

对电力半导体而言, 雪崩击穿是一种主要的击穿机构, 这里主要讨论 p^n 结的雪崩击穿。

(1) 雪崩击穿条件。 pn 结反向加高电压时, 由于空间电荷区中的电场作用使载流子