



GH

高等学校规划教材
工科电子类

电力半导体器件

聂代祚 编著



电子工业出版社

高等专科学校
工科电子类

规划教材

电力半导体器件

聂代祚 编著

电子工业出版社

(京)新登字055号

内 容 提 要

本书为1991~1995年的规划教材,全书系统地阐述了电力半导体器件的基本原理、特性,内容包括:电力半导体器件基础、功率整流二极管、大功率晶体管、GTR及其模块、晶闸管工作原理及静态和动态特性、门极可关断与双向晶闸管、晶闸管设计、新型电力电子器件等。

本书可供电力半导体器件专业的大学生阅读,也可供从事电力半导体器件制造、应用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力半导体器件/聂代祚编著.-北京:电子工业出版社,1994.10

ISBN 7-5053-2459-4

I. 电…

II. 聂…

III. 电力系统-半导体器件IV. TN303

电子工业出版社出版(北京市万寿路)
电子工业出版社发行 各地新华书店经销
北京市燕山联营印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 15.75 字数: 383千字

1994年10月 第一版 1994年10月 第一次印刷

印数: 1000册 定价: 9.00元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我公司承担了全国高等学校和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的共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时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，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我公司所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反应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，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导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、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教量的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质材而努力。

中国电子工业总公司教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1991~1995年编审出版规划,由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征稿审定、推荐出版的。责任编委为屠善洁。

本教材由西安理工大学聂代祚任主编,西安交通大学朱秉升教授担任主审。

电力半导体器件在我国电力电子学科的形成与发展中,起了重要作用。但至今没有一本半导体器件专业的电力半导体器件正式教材。本书根据已使用十多年的讲义基础上,结合作者的一些研究工作编著而成的。许多院校、研究单位和工厂,提供了资料及使用后的修改意见,使教材自成体系,具有一定的实践性,为跟踪世界先进水平,反映了器件原理结构的更新和最新技术。在此仅向顾廉楚、郭汉强、徐传骧教授,张为佐、陈守良、张志杰、黄跃先等高级工程师和肖蒲英、田敬民副教授以及西安理工大学教材科杨忠致科长等所给予的大力支持和宝贵意见一并表示深切谢意。

本课程的参考学时数为60学时,其主要内容为:功率整流管、大功率晶体管及模块、晶闸管及派生器件和新型电力电子器件的工作原理、特性分析,以及晶闸管的设计、少子寿命控制、表面造型与保护和封装技术。

本书由西安理工大学聂代祚编写绪论、第一、二、五至十章,张华槽编写第三、四章。评审者为本书提出了许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 电力半导体器件基础	8
第一节 半导体器件基本控制方程	8
第二节 电阻率与中子嬗变掺杂	10
第三节 大电流下的载流子输运	14
第四节 载流子寿命及其控制技术	17
第五节 热特性与封装技术	27
习题	33
参考文献	34
第二章 功率整流二极管	36
第一节 功率二极管的基本结构及类型	36
第二节 PN结二极管	37
第三节 PiN二极管	41
第四节 二极管的反向耐压特性	51
第五节 表面造型与保护	56
习 题	64
参考文献	65
第三章 大功率晶体管	67
第一节 大功率晶体管种类及结构	67
第二节 GTR的直流特性及电流放大系数	70
第三节 GTR的输出特性	73
第四节 GTR瞬态特性	75
第五节 大电流效应	79
第六节 GTR中的漏电流	81
第七节 GTR的耐压特性	85
习 题	89
参考文献	90
第四章 功率达林顿 GTR 及其模块	92
第一节 GTR模块的结构及种类	92
第二节 GTR模块的特性	95
第三节 GTR模块耐压特性	99
第四节 GTR模块的热特性	100
第五节 GTR的二次击穿与安全工作区	102
习 题	105
参考文献	105
第五章 晶闸管工作原理	106
第一节 概述	106

第二节 两端晶闸管工作原理	110
第三节 三端晶闸管工作原理	113
第四节 PNP结构的触发机构	117
第五节 短路发射极	121
习 题	124
参考文献	124
第六章 晶闸管的静态特性	126
第一节 晶闸管的反向特性	126
第二节 正向阻断特性	129
第三节 晶闸管的高温特性	136
第四节 门极特性	139
第五节 通态特性	146
习 题	153
参考文献	154
第七章 晶闸管的动态特性	156
第一节 开通特性	156
第二节 通态电流临界上升率	164
第三节 断态电压临界上升率	168
第四节 关断特性	171
习 题	177
参考文献	177
第八章 门极可关断与双向晶闸管	179
第一节 门极可关断晶闸管	179
第二节 双向晶闸管	189
习 题	196
参考文献	197
第九章 晶闸管的设计	198
第一节 晶闸管设计的特点及原则	198
第二节 晶闸管的设计方法	199
第三节 晶闸管设计举例	206
参考文献	209
第十章 新型电力电子器件	210
第一节 静电感应晶闸管(SiTh)	210
第二节 功率MOS场效应晶体管	219
第三节 绝缘栅晶体管(IGBT)	232
参考文献	245

绪 论

电力半导体器件与电力电子学

1956年可控硅整流器(英文缩写SCR, 泛称晶闸管)的发明^[1]并于次年由GE公司推出商品, 是半导体应用由弱电跨入强电的里程碑。其后平面工艺和外延技术的发明, 又使半导体器件向两大分支发展: 一支以晶体管或其它半导体器件组成愈来愈小的集成电路, 为适应微型化发展, 形成了以半导体集成电路为主体的新兴学科——微电子学; 另一分支则是以晶闸管为主体的功率(电力)半导体分立器件, 向愈来愈大的功率方向发展, 为解决电力电子与控制技术, 形成了以静态功率变换和电子控制为主要内容的新兴边缘学科——电力电子学。

一、电力半导体器件与电力电子技术

1973年, Newell在第四届国际电力电子学专家会议(PESC)上提出, 电力电子学是介于电器工程三大领域: 电力、电子与控制之间的边缘学科, 并用图0-1的所谓“倒三角”定义来说明。这一定义已被国际上所公认。根据“倒三角”定义, 电力电子学就是以晶闸管为主体的功率(电力)半导体器件为核心部件, 跨于电力、电子和控制三大领域的一门边缘学科。

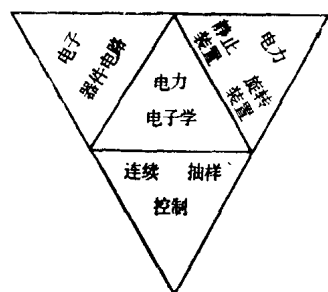


图 0-1 电力电子学“倒三角”定义

作为边缘学科的电力电子学, 它所包含的内容极其广泛, 既有半导体器件问题, 也有电路、控制、装置即器件的应用问题。尽管它们都有各自的理论基础、系统和发展方向, 但它们之间又是相互关联的。电力半导体器件的发展, 特别是新型器件的出现和采用, 都会以自己的特长占有不同的应用领域, 使应用面不断拓宽和扩大; 反过来, 电力电子技术的发展对器件提出更高的要求, 又会促进器件性能的提高和新器件的研究与发展。因为用什么器件及相应的串、并联技术, 用什么样的电路来实现装置设备, 反应了器件与线路之间的关系。新的器件能促使电路达到新的水平, 而新的电路则可弥补器件性能之不足。为了使电路达到更完善水平, 还必须提高控制水平; 这就要求采用新的控制方式和使用新的工具(例如微型计算机控制工具)。但是, 器件、电路及系统控制的最终目的是要完成一个实用的电力电子装置。由此可见, 电力电子学把器件、装置、控制系统紧密地联系在一起, 它们相辅相成, 形成一个具有内在系统性的有机体。

作为一门应用科学, 它广泛应用于科学研究, 国民经济中的电力、交通、通讯、冶金、机械、化工、仪器仪表及国防工业等部门, 并逐步推广到家用电器等应用领域。特别是电力电子技术作为节能最富有成效的技术之一, 已成为发展快、生命力强的技术之一。

电力电子技术作为国民经济各项高技术发展的基础技术, 为大幅度节能, 机电一体

化,提高生产效能提供主要支撑技术,而电力电子技术的核心和基础则是电力半导体器件。

二、电力半导体器件的分类与发展

电力电子技术发展的快慢,在很大程度上取决于电力电子器件的发展水平。器件容量的扩大和结构原理的更新,特别是新型器件的出现都是各种应用技术发展的要求和半导体器件理论、半导体材料、半导体工艺发展的结果。近三十年来,新技术、新工艺方面就出现了中子嬗变掺杂;电子辐照、 γ 辐照的寿命控制技术;器件的CAD技术;PN结表面造型及终端技术;器件的高可靠技术等;以及由微电子技术引入的精细加工技术,等等。电力半导体器件的基本理论,从电流模式发展到电荷控制模式;出现了短路阴极理论;表面理论;GTO晶闸管从一维关断理论发展为二维关断模式,引入了阳极短路,隐埋门极等新结构;GTR的达林顿结构形式引伸到各种复合器件,并成为MOS—双极型复合器件的基本结构形式;特别是微电子技术与电力器件制造技术相结合所产生的集成功率器件,使得以往不被人们重视的电力半导体一跃而成为高科技发展之列。此外,器件的封装已由压焊发展到压接式和全压接结构。总之,电力半导体已在材料、器件基本理论、设计原理、制造技术等诸方面形成了自己的体系和发展方向,成为半导体的一大独立分支。

电力半导体器件通常可分为四大类:功率整流管、功率晶体管、晶闸管和功率集成功能器件,其主要品种及达到的水平如图0-2所示。下面简要介绍各类器件的发展概况。

(一) 功率整流管

在这类器件中,快速整流管主要在开关和高频方面应用。由于在各种逆变器和斩波器中,不论用换流关断型晶闸管还是采用自关断器件(例如GTO、GTR或功率MOSFET),一般都需要一个与之反并联的快速二极管,以通过负载中的无功电流和减小电容充放电时间,这就促使快速整流管不论在品种上还是数量上都有较大幅度的发展。这当中,具有软恢复特性的快速整流管更是受到使用者的欢迎。

功率肖特基势垒二极管是多子器件,它是利用金属和硅接触面产生的肖特基势垒来实现整流作用的。由于此种器件没有少数贮存效应,反向恢复时间短,反向恢复损耗小,不仅工作频率高,而且降低了对吸收电路的要求,热稳定性也好。因此,采用功率肖特基势垒二极管可使直流电源小型轻量化,所以在计算机电源应用方面占有优势。目前已有压接式结构平板型封装的,商品化的3000A肖特基势垒二极管。^[2]

(二) 晶闸管类

晶闸管是一个家族,如图0-2所示,它包括五大类型:高压大电流型、快速型、自关断型、光控型及模块型。晶闸管是一个含有PNPN四层结构的三端器件,具有双稳态特性,可以用一个小的门极电流来触发器件导通,流过大的正向负载电流,因此在各个不同领域中得到了广泛的应用。晶闸管的功率控制容量范围很宽,但这种器件从通态转变为断态的关断速度太慢,只能在低频下工作,只能控制单向电流,且门极不能关断阳极电流。为提高器件的关断速度,发展了少数寿命控制技术,并从设计原理、结构等方面进行改进,不仅推出了快速晶闸管、非对称晶闸管,而且还出现了门极能够关断阳极电流的自关断型器件:门极可关断晶闸管(GTO)以及场控晶闸管等快速型器件。为了能控制双向电流,1964年又推出了双向晶闸管。晶闸管使用量大面广,仍然吸引科技人员去研究它,使器件在设

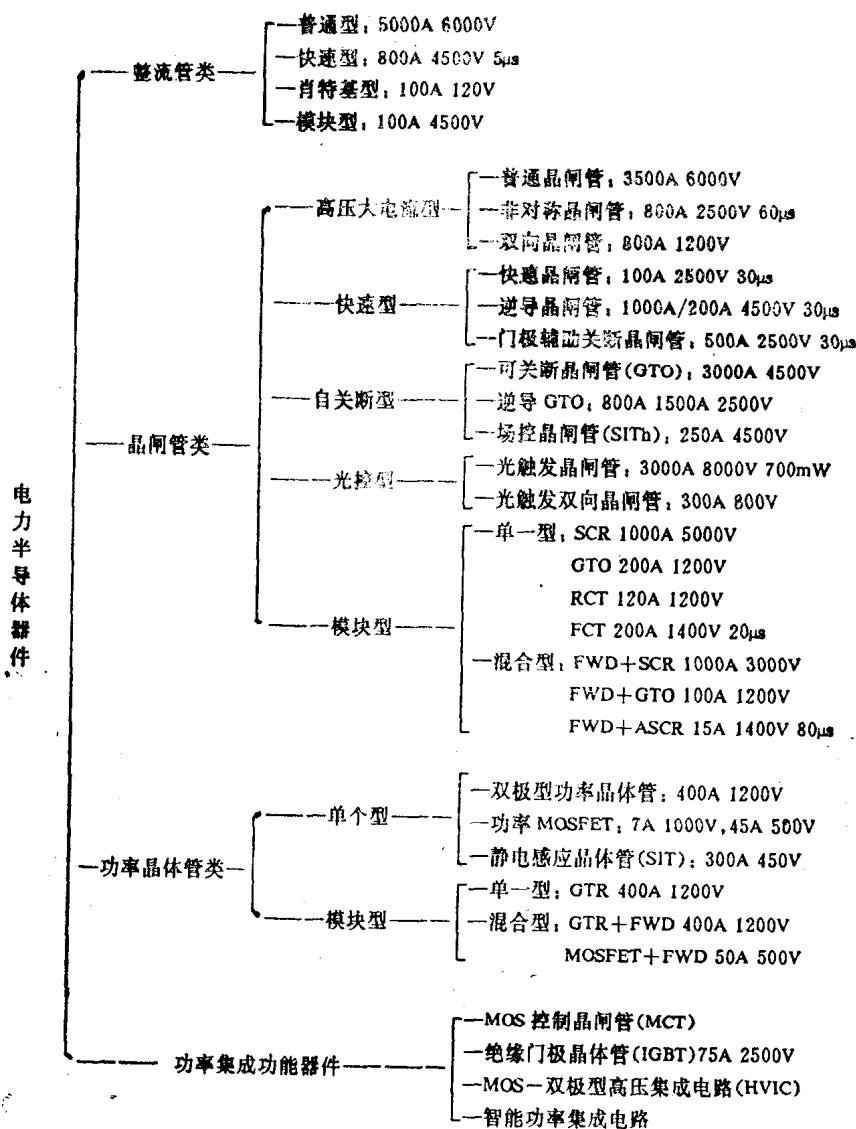


图 0-2 SiTh: 2500A, 4000V 电力半导体器件的分类及主要品种

计和制造方面不断有所改进, 功率控制容量不断增大, 工作频率不断提高。

(三) 功率晶体管类

这类器件具有开关速度快, 工作频率高等优点, 正迅速发展占领400A、1200V以下市场。双极型功率开关晶体管(GTR), 可以用基极电流关断集电极电流而具有自关断能力, 和可关断晶闸管(GTO)一样, 不需要强迫换流电路而使斩波器、逆变器 etc 电路大为简化, 因而受到使用者的欢迎。GTR有单管和模块两种, 目前400A、1200V的产品已实用化, 正研究600A水平GTR的实用化。虽然功率双极型晶体管的工作频率比起晶闸管来有了很大提高, 但因受到基区和集电区中的少子贮存效应的限制, 工作频率一般在1MHz以下。

利用电压控制功率器件, 可以消除少子贮存效应的影响, 提高工作频率并使电路大为

简化。功率MOS, SIT等便是电压控制型器件, 这种器件输入阻抗高, 驱动功率小, 是多子器件, 工作频率高, 热稳定性好, 可以并联实现大电流化。由于有重多优点, 发展甚快。随着功率容量的增大, 功率MOSFET已发展成为重要的电力半导体器件之一。功率MOS进入电力半导体舞台标志了近代集成电路技术已成功地应用于分立的功率器件。功率MOS是八十年代分立功率器件中发展最快的器件, 现在功率MOS管的耐压已达1000V以上, 电流在几十安培数量级。

(四) 功率集成功能器件

这一类器件是现代新型电力电子器件, 包括两种类型: MOS—双极型复合分立器件, 功率集成电路, 它又分为高压集成电路和智能功率集成电路两个类型。

1. MOS—双极型复合器件

MOS—双极型复合器件, 采用超大规模集成电路的精细加工技术, 把单极(MOS)器件与双极型器件组合一集成化, 以发挥两者各自的优点而研制出的更加理想的器件, 此类分立器件突破了以往电力半导体器件的性能界限, 将成为今后发展的方向。目前已研制出单片化的MOS—双极达林顿晶体管, 绝缘栅晶体管(IGT)^[3], MOS控制晶闸管(MCT)^[4]及MOS门晶闸管。其中IGT最为成熟, 已实用化, 生产水平已达到100A/500V, 400A/1400V, 研制水平为75A/2500V。1987年IEDM报导日本用硅片直接键合技术试制成功100A/1800V的IGT^[5]。

2. 功率集成电路

MOS技术在半导体功率领域的应用, 不仅开发了分立的MOS功率器件, MOS—双极型复合器件, 同时还开发了功率集成电路。人们将模拟或数字的传感/控制/保护功能与电力半导体器件(开关)集成在一起, 开发出单片功率(Power)集成电路(PIC)。目前已开发出的单片功率集成电路有两类: 一类为高压集成电路(HVIC); 另一类称为智能功率集成电路(Smart Power IC 简称SPIC)。

(1) 智能功率集成电路(SPIC)

SPIC是纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路以及传感器保护电路的单片集成, 它的“智能”表现在这种电路具有控制、接口和自动保护三方面的功能。智能功率集成电路也可称为智能功率器件, 它的“智能”必须是器件内部而不是由外部来实现的。SPIC不仅集成输出器件和驱动电路, 而且集成内部有过压、过流、过热、负载短路、开路等检测电路, 以及保护电路。为了实现自动保护, 通常都设有一个带有传感器的保护电路来切断处于危险状态之中的主电路。为达到智能化, 更为了实现与微计算机和CPU直接连结的复杂程序工作, 也有集成接口电路的动向。

(2) 高压集成电路(HVIC)

高压集成电路, 它是横向高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成。采用薄外延层与改进的CMOS制造工艺, 已做出1200V的高压集成电路, 它是将高压的横向DMOS、横向NPN晶体管、PN结二极管与低压的双极型晶体管和CMOS集成在同一芯片上的HVIC。这种电路主要用于交流电机控制、家用电器及各种电源等^[6]。

不论是HVIC或是SMART POWER, 都是把高压器件与低压器件做在一个芯片上, 因此必须解决这两类器件之间的隔离。隔离方法主要有: PN结隔离、自隔离和介质隔离。

功率集成电路将微电子技术和电力电子技术结合起来, 完成了集成电路功率化, 功率

器件集成化。人们预期它的出现和发展将引起一场新的电子学革命。

三、自关断电力半导体器件

根据器件作开关应用的特点，电力半导体器件可分为不可控和可控制两大类。而可控制器件又分为强迫关断和自关断两种类型。前者主要包括反向阻断晶闸管、逆导、逆变(快速)、双向及光控晶闸管等。

类型	双极型器件				单极器件	
结构						
	晶体管	达林顿晶体管	GTO	SITH	JFET	SIT
	复合型器件 (BI MOS)					
结构						
	FET达林顿	MOS门晶体管	MCT	IGT		

图 0-3 自关断电力半导体器件

分立半导体器件的主要趋势是自关断化，即开发自关断器件，并要在自关断的基础上，实现大容量、高频率、易驱动，低损耗等。根据不同的要求，到八十年代末，相继开发了可关断晶闸管(GTO)、巨型功率晶体管(GTR)、功率MOSFET、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)、绝缘栅晶体管(IGT)、MOS控制晶闸管(MCT)等等。由图0-3所示的自关断器件看出，它可以分为双极型、单极型和复合型器件三种。按其控制机能看，可分为电流控制型和电压控制型两种，除GTO、GTR为电流控制型，其余器件均为电压控制型。自关断器件在功能上既能控制导通，又能控制关断；在结构上是几十、几百、几千，乃至几万个具有相同功能的单胞并联的功率集成器件。每个单元的结构如图0-4所示。

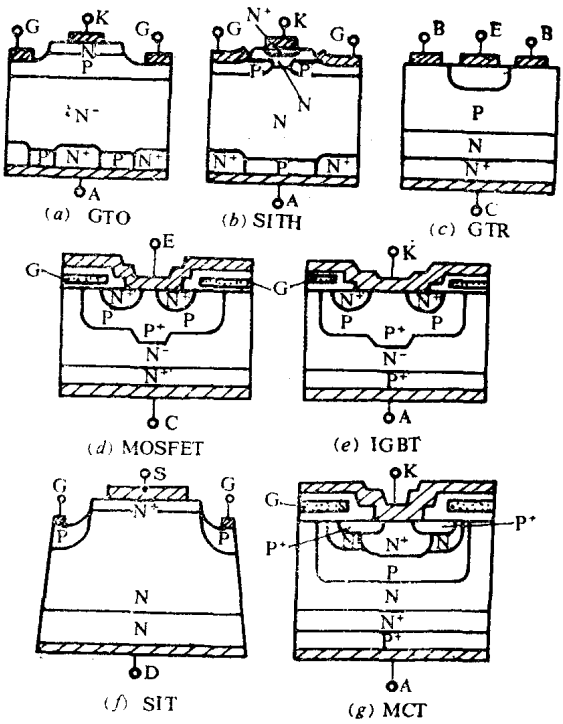


图 0-4 自关断器件的基本结构单元

在自关断器件中,目前研究最多的是 MOS 门器件 (IGT和MCT), 其次是场控器件 (SIT和SITH)。对于MOS门器件, IGT已经实用化, 较为成熟, 它是较理想的功率开关器件, 具有功率晶体管(GTR)的高电流密度、低饱和电压和功率MOSFET的高输入阻抗、高速特性, 所以研制、生产和应用都获得了飞跃的发展。单块IGT器件正在开发进一步改进通态电压和开关特性的折衷关系, 以实现更低损耗和更高的开关速度。与此同时, IGT开始向智能功率化模块发展, 现已发展到第三代。就内置功能看, 有连接功率器件和控制电压的接口电路, 过流、过热、过载(负载和模块自身)保护电路, 电路用的电源以及PWM控制电路等。显而易见, 第三代IGT智能功率模块具有逆变器的基本功能, 使应用系统的设计大为简化, 装置的零部件数大为减少, 提高了可靠性。

自关断电力半导体器件是实现逆变器小型轻量化、高效化、高性能化的理想元件。逆变器的发展将对各种频率的电源、工业应用、车辆应用以至家用电器等方面起到重要作用。其中最重要的是交流调速和开关电源。总之, 自关断器件的出现与发展, 使得通用逆变器也得到迅速发展。

四、电力半导体器件的发展趋势

八十年代, 国际上出现功率器件集成化, 集成器件功率化, 电力电子技术与微电子技术相结合的大趋势, 表现在两个方面: 第一个方面是开发大面积功率集成器件, 如自关断器件和高频器件, 它们既继承了晶闸管的高电压、大电流的成熟工艺经验, 又吸收了大规模集成电路的微细加工、计算机模拟和辅助设计等新技术成就, 使电力半导体器件达到高的性能/价格比; 另一方面是采用微机、专用集成电路、软件固化等微电子技术对电力电子电路进行控制、保护和检测。随着高频电力半导体器件和功率集成电路的出现, 电力电子技术已发展到高频电力电子技术, 现正向功率集成电力电子技术迈进。

从全面看, 分立电力半导体器件的主要发展趋势是高压、大电流化; 快速、高频化; 光输入化、易驱动化; 模块化、功能复合化和智能化。

五、基本内容及安排

根据电力半导体器件的分类, 本书分为四大部分内容: 第一部分为电力半导体器件基础及功率二极管; 第二部分为双极型功率晶体管, 主要介绍高压大电流晶体管和GTR模块; 第三部分为晶闸管, 包括工作原理、基本特性、设计原理以及可关断晶闸管(GTO)、双向晶闸管等; 第四部分为新型电力电子器件, 着重介绍比较成熟的功率 MOS、SITH 及 IGT 等。功率双极型器件及功率MOS器件, 在当前使用量大、面广是本书的重点, 也适合于国情。考虑到学时关系, 对于新型器件, 本书只讨论了较为成熟已实用化的器件, 对其它众多的新器件可放到选修中介绍。

参 考 文 献

- [1] J. L. Moll, M. Tanenbaum, J. M. Goldey, et al., "PNPN Transistor Switches", Proc. IRE, 44, 1174(1956)
- [2] [日] 村上幸男等“3000A平板型肖特基势垒二极管”, 任慧敏译, 《国外电力电子技术》, 1990.

- [3] B. J. Baliga, M. S. Adler, et al., "The Insulated Gate Rectifier (IGR). A New Power Switching Devices", IEDM Tech. Dig., pp.264-267(1982).
- [4] V. A. K Temple,, "MOS Contrlled Thyristor", IEDM Technical Digest, P. 282 (1984).
- [5] [日] Akio Nakagawa等, "1800伏双极型MOSFET—首次将硅片直接键合技术(SOB)用在功率器件上", 王季秋译, 《国外电力电子技术》, 1988·3:17.
- [6] E. J. Wildi, T. P. Chow, M. S. Adler, et al., " New High Voltage IC Technology" IEDM Tech. Dig. Abstract 10. 2, pp.262—265(1984).

第一章 电力半导体器件基础

电力半导体器件在大功率条件下工作, 器件物理的许多方面与低功率半导体器件有很大差异。例如, 高电流密度将影响到载流子的迁移率、扩散系数和少子寿命; 电力半导体器件面积非常大, 通常要用一整块硅片做一个器件, 因而对原材料的质量和均匀性有严格要求。另一方面, 器件的功率容量直接与关态时承受高电压的能力和开态时导通正向大电流的能力有关, 而且无论在稳态和瞬态条件下, 器件都要耗散大量功率, 所以散热问题是设计、制造和封装工艺应考虑的重要问题之一。

本章在半导体物理基础上, 重点突出半导体在高掺杂和大注入条件下的一些特性及器件控制方程。根据电力器件的特点, 介绍了中子嬗变掺杂技术, 少数载流子寿命控制技术, 热特性与封装技术作为学习电力半导体器件的基础。

第一节 半导体器件基本控制方程

本节将给出描述半导体中载流子的静态及动态性能的基本方程: 电流方程、连续性方程、泊松方程和电中性方程。这些方程在分析器件特性和进行计算机辅助设计时, 经常用到。

一、电流方程

半导体中载流子形成电流的机构有两种: 即载流子在电场作用下的漂移和在浓度梯度作用下的扩散, 前者称为漂移电流, 后者称为扩散电流。当半导体中同时存在载流子浓度梯度和电场作用时, 也就同时存在着扩散电流和漂移电流, 即电子电流和空穴电流均包含有扩散电流和漂移电流分量。在一维情况下可写成

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (1-1)$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (1-2)$$

半导体中总的电流密度 J 可写成

$$J = J_n + J_p = \left(q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \right) + \left(q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} \right) \quad (1-3)$$

对于非简并半导体, 利用爱因斯坦关系 $\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$, 上式可改写为

$$J = q\mu_n \left(nE + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) + q\mu_p \left(pE + \frac{kT}{q} \frac{dp}{dx} \right) \quad (1-4)$$

二、连续性方程

在外部条件作用下, 半导体中同时存在扩散、漂移、复合和产生作用时, 载流子浓度

随时间及空间变化的规律可由连续性方程来描述。对于 N 型半导体，少数载流子所遵守的方程可以写成，

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial p_n}{\partial x} - \mu_p p_n \frac{\partial E}{\partial x} + G_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (1-5)$$

对于 P 型半导体，同样可以写出

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n_p}{\partial x} + \mu_n n_p \frac{\partial E}{\partial x} + G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (1-6)$$

以上二式就是同时存在漂移运动和扩散运动情况下，少数载流子所遵守的方程，即一维连续性方程。

式(1-5)和(1-6)是能够完全地描述小注入时一维半导体中任意体积元内空穴和电子行为的基本方程。对于不同的工作状态，针对具体情况可对方程中各项加以取舍，再根据一定的边界条件和初始条件便能得出要求的载流子浓度分布的表达式。例如，在小注入条件下，体内电场强度近似为零($E \approx 0$)，如果不存在外加电场，并假定没有其他载流子产生源，即 $G_p = 0$ ， $G_n = 0$ ，则式(1-5)和(1-6)简化为

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (1-7)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (1-8)$$

以上两式为扩散方程。说明在小注入条件下，载流子浓度分布规律仅由载流子的扩散运动所决定。

三、泊松方程

半导体内的电荷分布直接决定着体内电场的分布。但在空间电荷区内，电荷、电场和电位之间存在着的内在联系是由泊松方程所表述，一维形式为

$$\frac{dU(x)}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1-9)$$

式中， ϵ_0 为真空电容率， ϵ_r 为相对介电常数， $\rho(x)$ 为体电荷密度。半导体内的正电荷有空穴和电离施主、负电荷有电子和电离受主，其浓度分别为 p 、 N_D^+ 、 n 和 N_A^- ，若考虑 $N_D^+ = N_D$ ， $N_A^- = N_A$ ，则电荷体密度 $\rho = q(p - n + N_D - N_A)$ 。

泊松方程决定着PN结耗尽层的性质，因而该方程是分析器件的一个基本方程。

四、电中性条件

在掺杂半导体中，多子和少子浓度是通过热平衡条件 $n_0 p_0 = n_i^2$ 和电中性条件来确定的。对于半导体中同时有施主和受主杂质的一般情况下，在热平衡状态时，若半导体是电中性的，而且杂质均匀分布，则空间电荷必须处处为零，因此有

$$p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^- \quad (1-10)$$

这就是同时含有一种施主杂质和一种受主杂质情况下的电中性条件。对于 N 型和 P 型半导体，电中性条件分别表示为

$$n_{np} = N_D^+ + p_{np} \quad (1-11)$$

和

$$p_{p0} = N_A^- + n_{p0} \quad (1-12)$$

式中的注脚“0”表示热平衡状态, N_D^+ 、 N_A^- 分别为已全部电离的施主和受主杂质浓度。

本节介绍了描述半导体中载流子运动规律的基本方程。考虑到多数情况下,研究的只是一维的问题,所以上述方程都采一维形式写出,但这些方程对于三维也适用,只要再加上和 x 相应的 y 、 z 的导数就可以了。

第二节 电阻率与中子嬗变掺杂

对于电力半导体器件,原始材料的电阻率是一个重要的参数,因为它决定着能达到的最大击穿电压和单极型器件的最大电流控制容量。

高压器件对电阻率的均匀性有更高的要求,为此本节还将介绍掺杂均匀性优良的中子嬗变掺杂硅,即中照单晶(NTD-Si)。

一、电阻率及其影响因素

电阻率是标志半导体材料状况的重要参数之一,它是由导带中的自由电子浓度、价带中的空穴浓度,以及这些载流子的迁移率来决定的。迁移率将载流子的平均速度与外加电场联系起来。自由载流子的来源有两个方面:一是电子从价带热激发到导带过程中所建立电子-空穴对;一是杂质电离时产生的对导电过程提供的电子或空穴。

对于高纯材料,载流子浓度完全由热激发产生的电子-空穴对所决定。这些载流子称为本征载流子,它由导带态密度 N_c 和价带态密度 N_v 及禁带宽度 E_g 决定⁽¹⁾;

$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2kT} \quad (1-13)$$

对于硅半导体

$$n_i = 3.87 \times 10^{16} T^{3/2} e^{-(0.02 \times 103)/T} \quad (1-14)$$

可见,一定的半导体材料, n_i 只是温度的函数。本征载流子浓度是一个重要参数,它决定了在高温时电力器件的漏电流。特别是当温度足够高以致 n_i 随温度上升而迅速增加,热激发产生电子-空穴对为主要过程时,器件将不能正常工作。所以,每一种半导体材料制成的器件都有一定的极限工作温度,超过这个温度,器件工作便会失效。

用来制作器件的半导体总是要掺杂的。对于杂质半导体,电阻率主要决定于掺杂剂的浓度。在常温下,半导体中的杂质几乎全部电离,故有 $n_{n0} \approx N_D$, $p_{p0} \approx N_A$,所以,N型、P型半导体的电阻率分别表示为

$$\rho_n = \frac{1}{q \mu_n n_{n0}} \quad (\text{N型}) \quad (1-15)$$

$$\rho_p = \frac{1}{q \mu_p p_{p0}} \quad (\text{P型}) \quad (1-16)$$

以上可见,由于电阻率是导带中的电子浓度、价带中的空穴浓度,以及这些载流子的迁移率来决定的,而载流子浓度和迁移率又都与杂质浓度和温度有关,所以,电阻率将随掺杂浓度和温度而变化。

(一) 电阻率与杂质浓度的关系