

PHEI

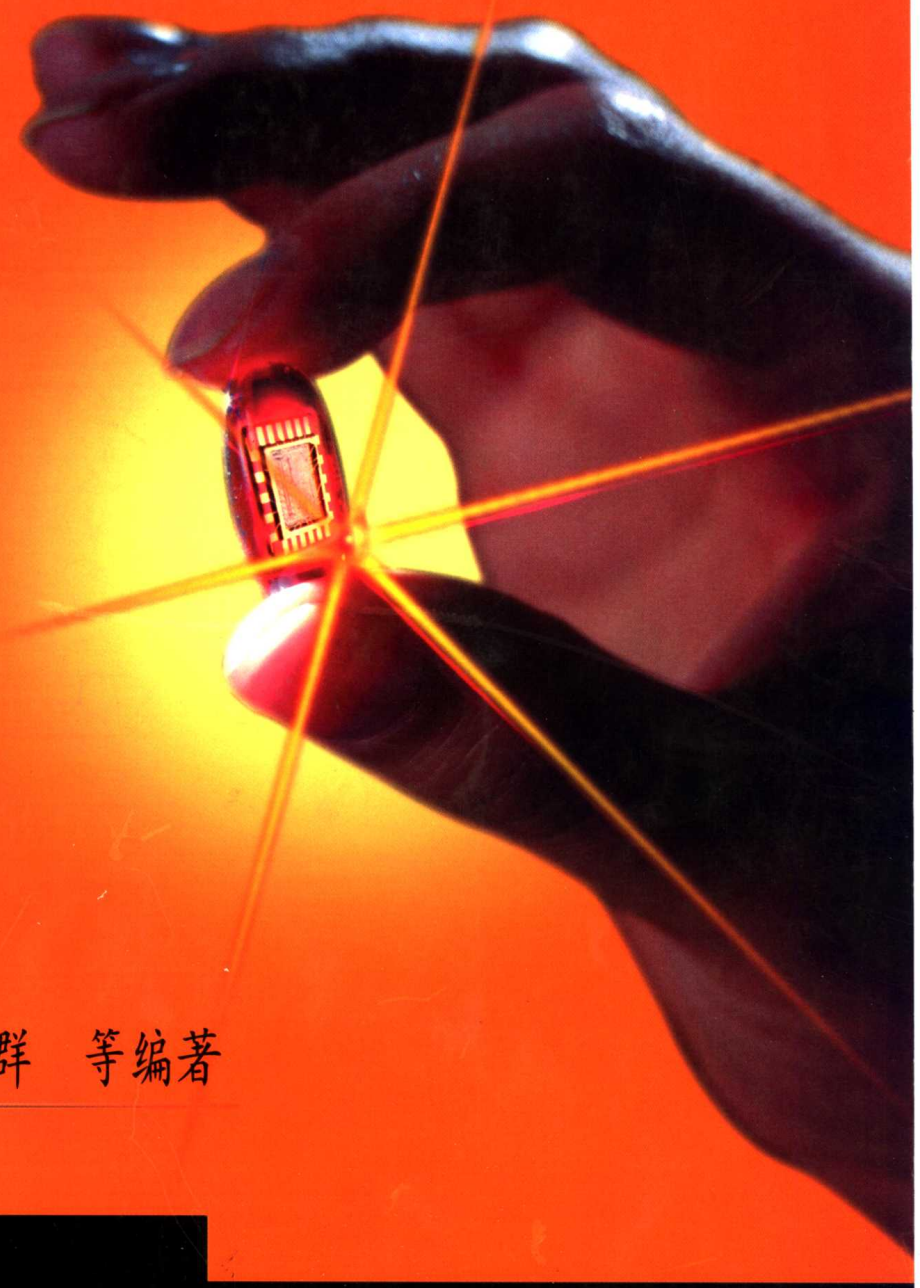
半导体器件——电力、敏感、光子、微波器件



高等学校电子信息类规划教材

半导体器件

— 电力、敏感、光子、微波器件



6713
0

刘刚 余岳辉 史济群 等编著

李卫 审校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息类规划教材

半导体器件

——电力、敏感、光子、微波器件

刘 刚 余岳辉 史济群 等编著

李 卫 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为高等学校电子信息类规划教材。主要内容为:电力半导体器件、半导体敏感器件、光子器件、半导体微波器件等四个方面。其中电力半导体器件主要包括大功率整流二极管、晶闸管、GTO及各种新型电力半导体器件;半导体敏感器件有温敏、力敏、磁敏、离子敏感器件以及湿敏、气敏器件,包括半导体陶瓷材料及Ge、Si、GaAs、InP等各种半导体材料构成的敏感器件;光子器件有光电器件、太阳能电池、发光器件及半导体激光器;微波器件则有各种微波二极管、微波双极晶体管和微波场效应晶体管,不仅有同质结器件,也有各种新型微波异质结器件,如Si/SiGe HBT、AlGaAs/GaAs HBT、HEMT、PHEMT及真空微电子器件等。几乎涵盖了半导体器件的各个领域。本书在论述这些器件的结构、类别、工作原理及特性参数的同时,也阐明了它们的应用范围,还列举了多种具体的应用范围及其工作机理。

本书可作为电子科学与技术、微电子学等专业本科生、研究生的教学用书,也可作为电力电子、自动控制、仪器仪表、通信及计算机等专业的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件:电力、敏感、光子、微波器件/刘刚等编著. —北京:电子工业出版社, 2000.9

高等学校电子信息类规划教材

ISBN 7-5053-5845-6

I. 半… II. 刘… III. 半导体器件-高等学校-教材 IV. TN3

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第68781号

丛 书 名: 高等学校电子信息类规划教材

书 名: 半导体器件——电力、敏感、光子、微波器件

编 著 者: 刘 刚 余岳辉 史济群

审 校 者: 李 卫

责任编辑: 陈晓莉

特约编辑: 胡 畅

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京大中印刷厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 563千字

版 次: 2000年9月第1版 2000年9月第1次印刷

书 号: ISBN 7-5053-5845-6
G·505

印 数: 3000册 定价: 28.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话: 68279077

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,但尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

原电子工业部教材办公室

前 言

本书出版十余年来,承蒙广大读者的厚爱,使之在教学、科研及产品开发等各个方面发挥了其应有的作用。在此,谨向使用本书的各位读者表示衷心的感谢。

半导体器件作为现代电子技术的核心,也是通信、计算机及网络技术的基础;近十年来,由于理论和技术的不断发展与突破,使得已有的器件日臻成熟,性能指标越来越高;许多新材料、新器件也相继涌现,并获得了广泛的应用。适时地将这些新理论与新成果融入本书,昭示读者,我们责无旁贷。根据“全国高校微电子技术专业教学指导委员会”清华会议的精神,确定该书作为部级重点教材修订出版,经过全体编者及几位编辑几年来的共同努力,本书的修订本终于得以面世。恰逢世纪交替之际,教育部颁发了新的专业目录,专业结构及课程设置均将作出重大调整;因此,拓宽专业口径、增加知识面、重在素质教育仍是本书的写作宗旨。

本书此次修订,一方面着眼于内容的更新,同时也注重了结构的调整和写作方法上的改进;特别是第一篇和第四篇,基本上重新进行了编写,故章、节的名称也与初版不同。

经修订后的本书,其内容更趋丰富新颖,不仅删除了某些过时、或用得较少的旧内容,同时也增加了不少有关半导体器件的新理论、新材料、新结构及新工艺等方面的新内容,几乎论及了近五十年来半导体器件研究的所有领域,并有利于读者及时了解各国科学家在电子器件方面的最新研究成果,掌握国际上的最新发展水平。在阐明基本原理的基础上,注意将材料、结构、工艺、特性和应用融为一体,既有利于器件的研制者知其应用,也有利于器件的使用者知其结构、原理与特性,将更有利于新器件的开拓与创造。全书结构合理,层次分明,语言流畅,可读性强。

全书共约 60 万字,约需 120 学时,每篇约 30 学时。也可选用其中一篇或几篇单独设课。

本书由刘刚担任主编,统筹全书的结构与内容,并负责第二篇和第四篇的编写;第一篇和第三篇分别由余岳辉、史济群编写。全书经李卫教授仔细审阅,由徐重阳教授任责任编辑,衷心感谢他们为本书的修订出版所作出的努力。同时还要感谢所有给予我们大力支持与鼓励的亲人和朋友们。

理论没有止境,技术还将继续发展,好书总需不断完善,敬请使用本书的众多读者仍能钟爱本书,赐予宝贵意见。

编 者
2000 年 4 月

目 录

第一篇 电力电子器件	(1)
第1章 电力电子器件概述	(1)
1.1 电力电子学与电力半导体	(1)
1.2 电力器件的分类	(2)
1.3 电力器件的基本应用	(3)
第2章 晶闸管	(7)
2.1 晶闸管的基本结构、等效电路及特性	(7)
2.2 晶闸管的工作原理	(8)
一、pnpn器件的导通物理过程	(8)
二、晶闸管的导通机理	(9)
三、触发机构	(10)
2.3 阻断模式	(12)
一、雪崩击穿与穿通效应	(12)
二、晶闸管的最佳反向阻断电压	(13)
三、晶闸管的正向阻断电压	(15)
四、晶闸管的最小长基区宽度 $W_{n(\min)}$	(17)
2.4 表面成型技术	(19)
一、半导体表面理论的几种基本观点	(19)
二、正斜角、负斜角及电场分布	(20)
三、电力器件的表面成型	(22)
2.5 门极特性	(24)
一、门极模型	(24)
二、晶闸管的短基区宽度	(25)
2.6 通态特性及功率损耗	(26)
一、正向传导模式	(26)
二、晶闸管的通态电压	(27)
三、晶闸管的功耗及热学设计	(31)
2.7 动态特性	(33)
一、开通特性	(33)
二、 $\frac{di}{dt}$ 耐量	(36)
三、 $\frac{dv}{dt}$ 效应	(40)
四、关断过程	(41)

第 3 章 特殊型晶闸管	(46)
3.1 双向晶闸管	(46)
一、双向晶闸管的基本结构及特性	(46)
二、触发方式及其原理	(46)
三、双向晶闸管的有关特性	(48)
3.2 逆导晶闸管	(48)
一、逆导晶闸管的结构及特点	(49)
二、逆导晶闸管的工作原理及换流特性	(50)
三、改善换流特性的措施	(50)
3.3 光控晶闸管	(50)
一、概述	(50)
二、光控晶闸管的工作原理	(51)
三、光触发灵敏度及光敏区结构	(52)
四、LTT 的光源	(57)
3.4 GTO	(58)
一、概述	(58)
二、GTO 的工作原理	(59)
三、GTO 的结构	(62)
第 4 章 现代电力电子器件	(64)
4.1 功率 MOSFET	(64)
一、功率 MOSFET 的基本结构和工作原理	(64)
二、功率 MOSFET 的主要特性	(65)
4.2 IGBT 及其应用	(66)
一、IGBT 的基本结构及工作原理	(66)
二、IGBT 的擎住现象	(67)
三、IGBT 的特性及应用中的几个问题	(68)
4.3 MOS 控制晶闸管	(72)
一、MCT 的基本结构及工作原理	(72)
二、MCT 的主要特点	(73)
4.4 GCT 与 IEGT	(73)
一、GCT (Gate Commutated Turn-off)	(73)
二、可耐高压的 IEGT	(74)
4.5 功率集成电路 (PIC)	(76)
一、单片三相逆变器 IC	(76)
二、工艺方法、器件技术	(77)
三、介质隔离的功率 IC 及特征	(79)
4.6 SiC 功率器件	(79)
一、期待中的 SiC 器件	(79)
二、器件电特性与物理参数的关系	(80)
参考文献	(83)
习题一	(85)

第二篇 半导体敏感器件	(87)
第5章 敏感器件概论	(87)
5.1 传感器及其分类	(87)
5.2 敏感器件所用材料	(90)
一、半导体材料的敏感特性	(90)
二、非晶硅半导体	(91)
三、金属氧化物半导体	(93)
四、传感器用光纤材料	(94)
5.3 敏感器件的研究方向	(95)
第6章 半导体温敏器件	(97)
6.1 温度传感器的发展	(97)
6.2 半导体陶瓷热敏电阻	(98)
一、半导体陶瓷热敏电阻的种类和参数	(98)
二、NTC热敏电阻	(99)
三、PTC热敏电阻	(102)
6.3 Ge、Si及SiC单晶热敏电阻	(104)
一、Ge、Si单晶热敏电阻	(104)
二、SiC热敏电阻	(106)
6.4 pn结及晶体管温敏器件	(106)
一、pn结正向电压的温度特性	(107)
二、晶体管温度敏感器	(107)
三、SiC pn结温度敏感器件	(108)
6.5 集成温度传感器	(109)
第7章 半导体力敏器件	(112)
7.1 力学量和力敏器件	(112)
7.2 半导体压阻效应	(112)
一、压阻效应	(112)
二、应变灵敏度	(113)
三、压阻系数	(114)
7.3 电阻式硅膜片压力敏感器件	(115)
一、电桥原理	(115)
二、膜片形状及电阻配置	(116)
三、材料的导电类型及晶向	(118)
四、芯片尺寸	(118)
五、力敏电阻的设计	(119)
7.4 压敏二极管及压敏晶体管	(120)
一、压敏二极管	(120)
二、压敏晶体管	(121)
7.5 集成压力传感器	(122)
7.6 力敏传感器的应用	(124)

第 8 章 半导体磁敏器件	(125)
8.1 霍尔器件	(125)
一、霍尔效应	(125)
二、霍尔器件的结构和工艺	(127)
三、参数与特性	(127)
四、霍尔器件的设计考虑	(129)
8.2 磁阻器件	(130)
一、磁阻效应	(130)
二、设计与制作	(131)
8.3 磁敏二极管	(132)
一、工作原理及结构尺寸	(132)
二、基本特性	(134)
8.4 磁敏晶体管	(135)
一、长基区磁敏三极管	(135)
二、磁敏 MOSFET	(136)
8.5 磁敏集成电路	(137)
8.6 磁敏器件的应用	(139)
第 9 章 半导体离子敏感器件	(141)
9.1 ISFET 的特点与应用	(141)
9.2 基本工作原理	(141)
9.3 ISFET 的设计和工艺	(144)
一、FET 的设计特点	(144)
二、离子敏感膜的类型和制备	(145)
9.4 ISFET 的特性和参数	(147)
9.5 生物膜敏感器件	(149)
9.6 多功能集成 ISFET	(150)
第 10 章 半导体湿敏器件	(153)
10.1 湿度和湿敏器件	(153)
10.2 湿敏器件的基本特性	(154)
10.3 氧化物半导体湿敏器件	(155)
10.4 氧化铝及高分子湿敏器件	(158)
一、 Al_2O_3 湿敏器件的结构和工艺	(158)
二、多孔膜的感湿机理	(159)
三、湿敏特性	(159)
四、高分子湿敏器件	(160)
10.5 MOS 湿敏器件及集成化	(161)
10.6 湿敏器件的应用	(162)
第 11 章 半导体气敏器件	(164)
11.1 气敏器件的类型	(164)
11.2 氧化物半导体气敏元件	(166)

一、敏感机理	(166)
二、特性及影响因素	(167)
三、常见陶瓷气敏元件	(171)
11.3 半导体气敏二极管	(174)
11.4 MOSFET 气敏器件及多功能集成气敏器件	(175)
一、H ₂ 敏 MOSFET	(175)
二、CO 敏 MOSFET	(175)
三、气敏器件的多功能化、集成化	(177)
11.5 气敏器件的应用	(178)
参考文献	(180)
习题二	(182)

第三篇 半导体光子器件

第 12 章 半导体太阳电池

12.1 半导体太阳电池的光生伏特效应	(185)
一、光伏效应的两个基本条件	(185)
二、等效电路、伏安特性及输出特性	(187)
12.2 太阳电池的光电转换效率	(189)
一、太阳辐射光谱 AM0 和 AM1.5	(189)
二、太阳电池的理论效率	(190)
三、影响太阳电池效率的一些因素	(191)
12.3 高效率太阳电池的发展	(199)
一、高效率硅太阳电池的发展	(199)
二、高效、长寿命砷化镓太阳电池	(202)
12.4 低成本太阳电池	(203)
一、太阳电池级硅(SOG-Si)	(203)
二、多晶硅太阳电池	(204)
三、非晶硅太阳电池	(204)

第 13 章 半导体光电探测器

13.1 概述	(208)
13.2 光敏电阻	(209)
一、结构、原理及参数	(209)
二、主要光敏电阻的分类、用途及特点	(213)
13.3 光敏二极管	(216)
一、光敏二极管的特点	(217)
二、耗尽层光敏二极管	(217)
三、雪崩光敏二极管	(222)
13.4 光伏控制器件	(225)
一、双极型光敏晶体管	(225)
二、光敏场效应晶体管	(227)

第 14 章	CCD 摄像传感器件	(228)
14.1	概述	(228)
14.2	CCD 摄像器件的作用及工作方式	(228)
14.3	工作的物理基础	(229)
一、	光电转换—信息电荷“图像”产生	(229)
二、	电荷存储	(229)
三、	电荷转移、转移效率及频率响应	(231)
14.4	分类、用途、结构及工作原理	(235)
一、	分类与用途	(235)
二、	帧传输 CCD 面型摄像器件的结构	(235)
三、	工作过程	(236)
第 15 章	发光二极管和半导体激光器	(238)
15.1	pn 结注入式场致发光原理	(238)
一、	激发	(239)
二、	复合	(239)
15.2	发光二极管	(242)
一、	可见光发光二极管	(242)
二、	红外上转换发光管	(245)
三、	红外发光二极管	(246)
15.3	半导体激光器	(247)
一、	半导体激光器特点及材料	(247)
二、	半导体受激发射	(248)
三、	不同结构的半导体激光器	(251)
参考文献		(259)
习题三		(261)

第四篇 微波半导体器件 (263)

第 16 章	微波二极管	(266)
16.1	变容二极管	(266)
一、	变容二极管基本工作原理	(266)
二、	变容二极管主要参数	(268)
三、	变容二极管结构和工艺	(269)
四、	调谐变容二极管	(270)
16.2	阶跃恢复二极管	(271)
16.3	pin 二极管	(272)
一、	结构及工艺	(273)
二、	基本工作原理	(273)
三、	特性与参数	(274)
16.4	雪崩渡越时间二极管	(277)
一、	崩越二极管基本工作原理	(278)
二、	结构与工艺	(280)

三、主要参数	(282)
四、势垒二极管和速越二极管	(283)
16.5 肖特基势垒二极管	(285)
一、肖特基势垒	(286)
二、伏安特性	(287)
三、等效电路和参数	(289)
四、结构和工艺	(290)
第 17 章 转移电子器件	(292)
17.1 转移电子效应	(292)
17.2 高场畴	(294)
17.3 基本工作模式	(296)
17.4 限累二极管	(298)
17.5 结构、工艺及特性	(299)
第 18 章 微波双极晶体管	(301)
18.1 微波晶体管的 S 参量	(301)
18.2 硅微波双极晶体管	(303)
18.3 异质结双极晶体管	(306)
一、HBT 的理论基础	(306)
二、HBT 的制作方法与结构	(309)
三、HBT 的特性	(311)
四、HBT 的设计	(313)
五、Si/SiGe/Si HBT	(314)
第 19 章 微波场效应晶体管	(317)
19.1 砷化镓场效应晶体管	(317)
一、GaAs MESFET 的基本结构与工作原理	(317)
二、GaAs MESFET 的主要特性	(319)
三、低噪声 GaAs MESFET	(321)
四、功率 GaAs MESFET	(323)
19.2 高电子迁移率晶体管	(324)
一、基本工作原理	(325)
二、特性	(327)
三、结构和设计	(329)
四、PHEMT 和 InPHEMT	(331)
19.3 真空微电子器件	(333)
一、基本工作原理和结构	(334)
二、材料及工艺	(335)
参考文献	(337)
习题四	(338)

第一篇 电力电子器件

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 npn 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。同时简单介绍电力电子器件的新进展。

第 1 章 电力电子器件概述

1.1 电力电子学与电力半导体

50 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(国际电工委员会)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。20 世纪 50 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。50 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。60 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 100mm,电流近万安培,反向电压近万伏的整流二极管。

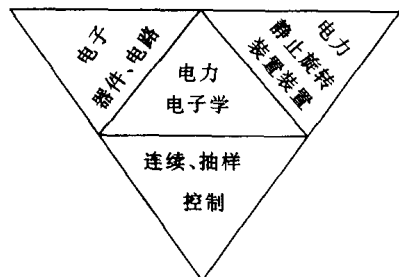


图 1-1 电力电子学的定义

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. (美国通用电气公司)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(Silicon Control Rectifier),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。60 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。70 年代中期,晶闸管设计集成化,出现了场控晶闸管。70 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(Gate Turn-off Thyristor)、光控、GTR(Giant Transistor)、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)、MCT(MOS Controlled Thyristor)以及 GCT(Gate Commutated Turn-off)、IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)等器件获飞速发展,成为 20 世纪末引人注目的一类器件之一。

随着 MOS-FET 的发展,出现了 80 年代另一类引人注目的高智能化器件——单片高压集成电路(High Voltage Integrated Circuits),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。

21 世纪初,电力电子器件仍然还是向功率化、快速化、模块化、智能化方向发展,在变换和控制领域有着广泛的应用。随着核电、超导的使用以及电力电子应用的进步,像 SiC 一类的新材料和新器件还将不断出现。

1.2 电力器件的分类

电力电子器件门类繁多,计 50 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、应用方式等来分类。表 1-1 是常用的典型器件分类表:

表 1-1 常用器件分类

器件	类型		名称	
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(PCT)
				门极辅助关断晶闸管(GATT)
				光控晶闸管(LTT)
				双向晶闸管(BCT)

器件	类型		名称	
可控制器件	自 关 断 型	双极	GTO	门极可关断晶闸管
			GCT	门极换相关断晶闸管
			GTR	单一型
		达林顿型		
		MOS	MOS 型	MOS-FET
			MOS 双极混合	场控晶闸管(FCT)
			MOS 双极 功能集成	绝缘栅双极晶体管(IGBT)
				促进电子注入栅极晶体管(IEGT)
				MOS 栅晶闸管(MGT)
			高压集成电路(HVIC)	
组合型器件	功率模块(Power Modules)与组件(Stacks)智能模块(IPM)			

1.3 电力器件的基本应用

电力电子是一门用电子的手段控制电气主回路的电流,以进行功率变换和控制的相关技术。正实用化早期 Newell 提出的那样,电力电子学的技术领域如图 1-1 所示,为电子技术、电力技术、控制技术的边缘区域。具体包括:

(1) 电力半导体器件。晶闸管、功率晶体管、GTO、MOSFET、SIT(静电感应晶体管)、IGBT(绝缘栅双极晶体管)等新器件。

(2) 电力变换电路。整流电路,逆变、斩波、变频等基本电路以及控制电路、保护、滤波电路等。电力变换电路是电子电路的一种,为了高效处理功率,构成电路的半导体器件工作在开关状态,得到所需要的电压电流波形以实现电力变换。

(3) 静止形电源装置。直流稳压电源,不停电电源 UPS 的 CVCF 装置,加热、焊接电源,新型太阳能电池、燃料电池电源等。

(4) 电动机的可变速驱动系统。通过感应电动机的电气机械技术、变换器或控制用微机的电子技术、频率控制或驱动控制的控制技术而紧密相连不可分割。

(5) 适时控制等现代控制理论,CAD、CAE 数值解析与模拟。在早期的电力电子学范围,如果说晶闸管或产生控制信号的非线性模拟电路是依赖硬件要素的话,则随着微机或数字信号电路(DSP)LSI 的实用化,控制系统中大量使用的软件正成为中心。随着电子器件的集成化,图 1-1 中电子技术的内容里,含软、硬件的计算机技术的份量正在增加。

电力电子器件的基本应用大体可分为两大类,即开关功率控制与功率变换。

1. 开关功率控制

功率开关是功率控制和变换的最基本工作单元,通过控制开关开态的时间与断态的时间以调整平均功率,即时间比率控制(Time Ratio Control)。

如图 1-2(a)所示,某一电压 E 的直流电源里连接了一电阻 R_L ,这一负载中流过的电流假定如图 1-2(b)连续变化(因此消耗的功率也连续变化),最简单情况如图 1-2(a)所示的负载加串联一电阻值从 $\infty \sim 0$ 可连续变化的可变电阻器 R_V 。用晶体管代替可变电阻,其基极电流连续变化,则可实现电子式开关。根据这一方法,很容易得到随给定电流(电压)变化的输出电流

(电压)值。音响中功率放大器就是基于这一原理。但是,用这一方法在负载和可变电阻上消耗的功率的比与 R_L 和 R_V 的比成比例,而效率 η 为负载上消耗的功率与由电源提供的功率之比,即:

$$\eta = R_L / (R_L + R_V)$$

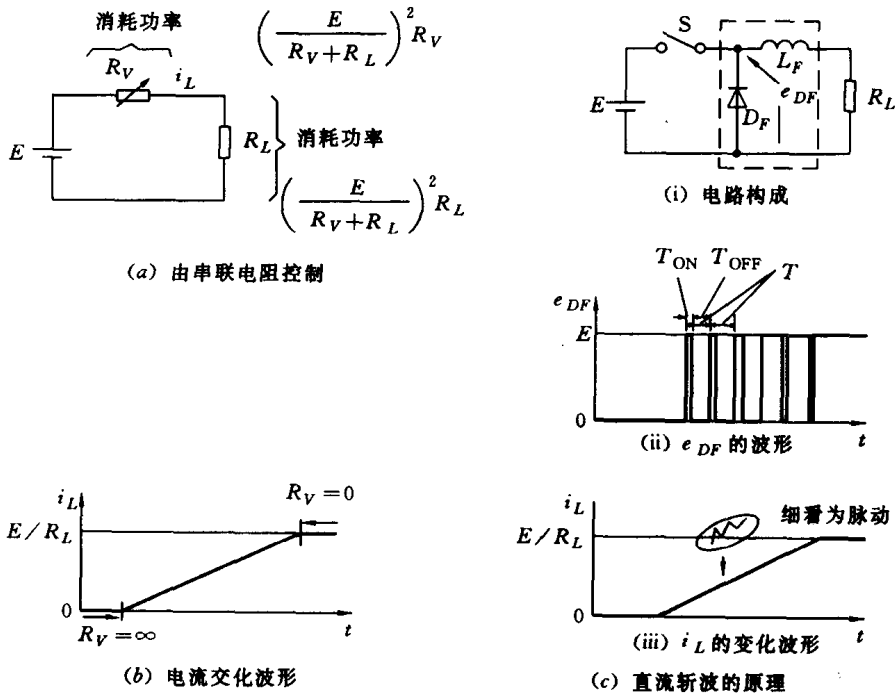


图 1-2 开关功率控制原理

可见 R_V 变大则效率下降。另外为了抑制可变电阻(晶体管)温度上升,必须有大的散热器。在电力电子装置中,因为效率是重要的因素,实际上以上的方式不能应用。

考虑用开关代替变阻器。开关状态因为只有开通或关断,故负载电流只有 0 或 E/R_L 两个值。图 1-2(c)所示为用开关进行功率连续调整的基本原理。图 1-2(c)(i)中虚线框内的二极管和线圈是滤波部分。(ii)中所示开关保持开/关的周期 T 一定,让开的时间 T_{ON} 慢慢增加,加在二极管上的电压 e_{DF} 如图示那样,开通时为电源电压 E ,断开时变为 0。则开关一周期的平均电压与 T_{ON} 成比例增加,最终电源的电压全部加到负载上,随着开关的增减可得到图(iii)所示一平滑连续的负载电流。

由上述工作原理可知,开关频率越高,用小的电感线圈可得到一平滑的电流。图 1-2(c)所示为直流逆变器(直流斩波装置)的原理,时间比率控制是通过脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)来实现的。开关元件开态时压降特别小,断态时阻抗非常大,几乎不流过电流,因此开关的损失极小。虚线内的二极管、线圈的损失同样很小,从理论上讲这种电力变换可以是无损耗的。但是实际的半导体开关元件中,其开关的速度是有限度的,通态时的压降并不是 0,而是有开关损耗产生。同时,构成电路的配线必然存在电感,在迅速开关电流时开关的两端产生高电压,损坏元件并引起电磁干扰,值得引起人们的足够重视。实用化的电力电子装置中,高性能和高可靠性主要决定于开关元件的特性,因此,获得大容量的、通态压降低的快速开关元件是所希望的。

2. 功率变换

利用上述开关技术可构成各种变换装置、控制装置。表 1-2 是根据输入输出的功率是交流还是直流将基本的装置分为四类。这些变换装置通过各种各样的方式实现,正走向实用化。电力变换的基本原理如图 1-3 所示,可以用电源和负载间连接的四个开关来说明。

表 1-2 电力变换装置、控制装置由输入输出形态分类

输入	输出	变换装置、控制装置
交流	直流	正变换装置(又称为整流装置)
交流	交流	交流功率调整装置 频率变换装置(间接式;直接式—变频器)
直流	交流	逆变装置(又称逆变器)
直流	直流	直流变换装置(间接式;直接式—斩波器)

(1) 正变换装置(又称整流装置)

正变换装置就是将交流变为直流的电力变换装置。图 1-3 的 AA' 间接交流电源, BB' 间接负载, 图 1-4(a)②所示的交流电源电压同①的波形保持一定的相位关系(称为同相), 操作图 1-3 的开关, 在负载上可得到③的波形。改变开关的相位角 α , 可连续调整输出的平均电压。用二极管作为四个开关元件时, $\alpha=0$ 可自动开关得到众所周知的全波整流波形。

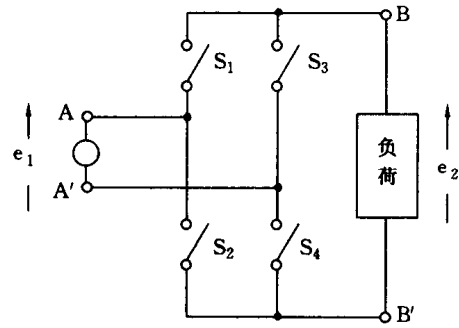


图 1-3 电力装置的变换原理

整流装置可作为情报机器、音响、录像设备等需要直流的电子仪器、设备的电源。在电铁、电镀、焊接等电源领域也广为应用。

(2) 交流变换装置

分为两种,一是控制从交流电源送往负载的交流功率,称之为交流功率调整装置。另一种是将交流变为不同频率的交流的变换,称为频率变换装置。频率变换装置由整流和逆变装置组成。将交流变为直流之后再变成交流的变换称为间接式逆变,直接将交流变为不同频率的交流称直接式逆变,又称为变频。

图 1-4(b)所示为交流功率调整的工作原理,通过调整所加在负载上电压的延迟角以达到调整功率的目的。为此开发了双向半导体开关,在电热毯以及各种取暖器、调光装置、电炉等电器领域内广泛应用。

图 1-4(c)所示是变频器的基本工作原理。去掉电源波形的有些部分再连接起来,直接得到一个比电源频率更低频率的交流功率的方式。从工作原理可知,输出频率愈高,波形畸变愈严重,实用上输出的上限频率为 $1/3 \sim 1/2$ 电源频率。在大功率应用的轧机的电机驱动、水泵的可变速驱动以及超大容量回转炉的驱动系统中正得到广泛应用。另外用电力变换将通用的周波变为最佳周波,可使通信、情报机器等实现小型化。由数万赫兹的高频到商用频率的变换也被应用。

(3) 逆变原理