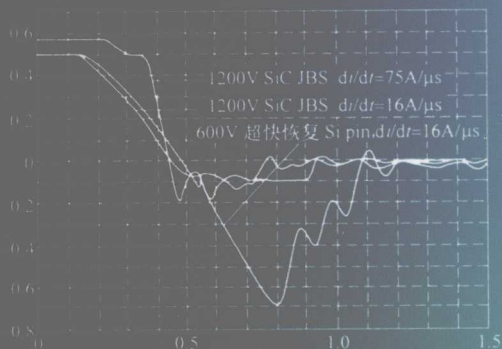


电力电子
新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎陈治明 李守智 编著

宽禁带半导体 电力电子器件及其应用

KUANJINDAI BANDAOTI DIANLIDIANZI
QIJIAN JIQI YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

宽禁带半导体 电力电子器件及其应用

陈治明 李守智 编著



机械工业出版社

本书介绍碳化硅、氮化镓和金刚石等宽禁带半导体电力电子器件的原理、特性、设计制造方法及应用,概括了这一新领域十余年来主要成就。内容包括:半导体物理基础,电力电子器件的基本原理、特性及典型器件,电力电子器件的材料优选,碳化硅整流器、功率 MOSFET、功率 JFET 和 MESFET、BJT、SICGT、IGBT、碳化硅功率集成电路中的高压器件、氮化镓功率器件、金刚石器件、宽禁带半导体功率模块,以及宽禁带半导体电力电子器件在开关电源功率因数校正器和各种电力变换器中的典型应用等。

本书面向电力电子技术、自动化技术以及能源技术等领域的广大工程技术人员和研究生,在满足器件专业人士对宽禁带半导体电力电子器件研发问题的深度要求的同时,也尽可能照顾到非专业人士的知识背景。

图书在版编目 (CIP) 数据

宽禁带半导体电力电子器件及其应用/陈治明,李守智编著. —北京:机械工业出版社,2008.10

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-25165-1

I. 宽… II. ①陈…②李… III. 半导体器件:电子器件
IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 145688 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孙流芳 责任编辑:孙流芳 罗莉

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.25 印张 · 352 千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-25165-1

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379762

封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主任：王兆安

副主任：白继彬 牛新国 徐德鸿 杨 耕

委员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈 坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康 勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨 耕	杨 旭	余岳辉	张 波
张承慧	张为佐	张卫平	张 兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周 波	周锥维	查晓明

秘书组：陈守良 刘进军 孙流芳 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来,使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化,同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前,电力电子技术仍以迅猛的速度发展着,新的电力电子器件层出不穷,新的技术不断涌现,其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国,电力电子技术都已造就了一个很大的产业群,如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业,这个产业群就更加庞大了。与之相应,在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大,且与日俱增。因此,组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍,以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考,成为眼下的迫切需要。

在20世纪80年代,电力电子学会曾和机械工业出版社合作,出版过一套电力电子技术丛书,那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近,电力电子学会经过认真考虑,认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此,成立了专门的编辑委员会,负责确定书目、组稿和审稿工作,向机械工业出版社推荐,仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

1. 本系列图书属专题论著性质,选题新颖,力求反映电力电子技术的新成就和新经验,以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际,以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格,作者都是在电力电子技术第一线工作的专家,且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于阅读学习。

本系列图书编委会中,既有一大批国内资深的电力电子专家,也有不少已崭露头角的青年学者,其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助,并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

50年前晶闸管(SCR,曾称为硅可控整流器(SCR))的问世及其随后不长时间对水银整流器和各种真空功率开关管的全面取代,奠定了电力电子技术的发展基础,并以其巨大的节能效果激励着电力电子系统与电力电子器件技术的不断发展。但是,以半导体硅作为基础材料的电力电子器件发展到现在的IGBT阶段可说已“江郎才尽”,很难满足今后电力电子系统对整流器和功率开关器件在阻断电压、通态电流、工作频率,以及高效、高温等方面的更高要求。于是,随着碳化硅晶体制备技术和氮化镓器件技术的渐趋成熟,以碳化硅为主的宽禁带半导体电力电子器件的研发从20世纪90年代初起逐渐受到业界人士的关注,并于世纪更替之时形成热潮,碳化硅肖特基势垒二极管于新世纪初实现商品化,碳化硅JFET即将进入商品化阶段。

作为“电力电子新技术系列图书”的首批出版物之一,本书遵循“应用为主,力求反映电力电子技术的新成就和新经验”的编撰宗旨,介绍碳化硅、氮化镓和金刚石等宽禁带半导体电力电子器件的原理、特性、设计制造方法及其实际应用。作者广采全球最新信息,力图概括这一新领域十余年来主要成就。为了帮助非半导体器件专业人员充分认识和理解这些新型器件,以使其得到更好更广泛的应用,本书还对电力电子器件的基本原理和特性,以及宽禁带半导体相对于硅等常用材料的特征优势作了详尽而深入浅出的论述。本书内容包括:半导体物理基础,电力电子器件的基本原理、特性及典型器件,电力电子器件的材料优选,碳化硅整流器、功率MOSFET、功率JFET和MESFET、BJT、SICGT、IGBT,碳化硅功率集成电路中的高压器件、氮化镓功率器件、金刚石器件、宽禁带半导体功率模块,以及宽禁带半导体电力电子器件在开关电源功率因数校正器和各种电力变换器中的典型应用等。

由于宽禁带半导体材料和器件目前都还处于研发阶段,整个领域的发展态势和各种具体器件的结构特征和技术水平变化很快,其应用更会有日新月异的发展,本书出版之时或许已有一些内容时过境迁。所以,本书仅以吸引更多人对宽禁带电力电子器件的关注为目的,希望宽禁带电力电子器件的开发和应用能够在国内早日普遍开展起来。

本书第1~4章由陈治明撰写,第5章由李守智撰写,文中错漏之处欢迎读者批评指正。

本书编写提纲曾由“电力电子新技术系列图书”编委会组织审查并提出宝贵意见,作者在此向他们深表谢意。

作者

2008年7月于西安理工大学

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 电力电子器件概述 1

1.1.1 电力电子器件的基本构成 1

1.1.2 电力电子器件的分类及特点 2

1.2 发展沿革与趋势 5

参考文献 8

第 2 章 电力电子器件基础 9

2.1 半导体物理基础 9

2.1.1 半导体与金属中的载流子 10

2.1.2 电子在金属和半导体中的能量分布与跃迁 15

2.1.3 半导体的热敏感性 19

2.2 电力电子器件的基本原理与特性 20

2.2.1 整流原理与阻断特性 20

2.2.2 开关原理与频率特性 30

2.2.3 电导调制原理与通态特性 42

2.2.4 功率损耗原理与高温特性 43

2.3 典型电力电子器件及其特性 51

2.3.1 二极管 51

2.3.2 双极型晶体管 (BJT) 60

2.3.3 场效应晶体管 (FET) 66

2.3.4 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 88

2.3.5 其他电力电子器件 100

参考文献 110

第 3 章 电力电子器件的材料

优选 111

3.1 单极型器件的材料优选 112

3.1.1 低频器件 113

3.1.2 高频器件 118

3.1.3 场效应器件的最高工作频率 120

3.2 双极型器件的材料优选 122

3.2.1 Johnson 因子 122

3.2.2 Keyes 因子 127

3.3 耐高温器件的材料优选 130

3.3.1 热优选因子 130

3.3.2 不同材料器件高温特性的比较 133

3.4 电力电子器件的优选材料 138

3.4.1 碳化硅 140

3.4.2 氮化镓及其固溶体 166

3.4.3 半导体金刚石 174

参考文献 180

第 4 章 宽禁带半导体电力电

子器件 183

4.1 碳化硅单极型器件 184

4.1.1 肖特基势垒二极管 184

4.1.2 功率 MOSFET 188

4.1.3 JFET 和 SIT 197

4.1.4 MESFET 204

4.2 碳化硅双极型器件 207

4.2.1 pn 结二极管 207

4.2.2 双极型晶体管 (BJT) 212

4.2.3 晶闸管和 GTO 晶闸管 219

4.2.4 碳化硅 GCT (SICGT) 222

4.3 碳化硅 IGBT 225

4.4 碳化硅功率集成电路中的 高压器件结构	230	电源 PFC 中的应用 效果	257
4.5 其他宽禁带半导体电力电子 器件	236	5.2 在 DC/DC 变换器中的典型 应用	261
4.5.1 氮化镓大功率微波 器件	237	5.2.1 DC/DC 变换器的基础 知识	261
4.5.2 其他氮化镓电力电子 器件	242	5.2.2 宽禁带半导体器件在 DC/DC 变换器中的应 用实例	262
4.5.3 金刚石电力电子器件	244	5.3 在 AC/DC 变换器中的典型 应用	265
4.6 宽禁带半导体功率模块	246	5.4 在 DC/AC 变换中的典型 应用	273
参考文献	249	5.4.1 DC/AC 变换及目前存 在的一些问题	273
第 5 章 宽禁带半导体电力 电子器件的应用	254	5.4.2 宽禁带半导体器件在 DC/AC 变换中的应用 实例	275
5.1 在开关电源功率因数校正 器上的典型应用	254	参考文献	278
5.1.1 开关电源功率因数校 正器的基本工作原理	254		
5.1.2 二极管的反向恢复特性 及其影响分析	255		
5.1.3 SiC 肖特基二极管在开关			

第1章 绪 论

电力电子器件是指在各种电力电子电路中起整流或开关作用的有源电子器件。现代电力电子器件基本上都是半导体器件，因而又叫电力半导体器件。虽然目前绝大多数电力电子器件都是用硅（Si）材料做成的，但是用碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）等宽禁带半导体材料可以做成性能更加优越的电力电子器件。自20世纪90年代初开始，对宽禁带半导体电力电子器件的研发工作迅速展开，进展很快，并随着新世纪的到来，逐渐进入商品化阶段。本书重点介绍宽禁带半导体的特点、用宽禁带半导体制造电力电子器件的目的和意义、主要宽禁带半导体电力电子器件的研发进程和最新成果，以及宽禁带电力电子器件的应用范例和效果。

作为绪论，本章简要回顾电力半导体器件的发展历程，借以展示宽禁带半导体电力电子器件的研发背景。

1.1 电力电子器件概述

电力电子器件是半导体器件中额定通态电流较大、阻断电压较高、在电路中主要起整流或开关作用的一类有源器件，通常以分立器件的形式使用，但其中一些也可用微电子工艺与电阻、电容等无源元件和半导体传感器等实行单片集成，制成功率集成电路。电力电子功能模块（组件）本质上也是分立器件的一种应用形式，是两个以上分立器件芯片的组合式封装，不属于集成技术的范畴。

1.1.1 电力电子器件的基本构成

跟其他半导体器件一样，电力电子器件也是由不同导电类型（p型或n型）的半导体薄层或微区，以及金属薄层和介质薄层，用特种工艺组合而成的。不同的组合方式形成了半导体器件的三种基本构成元素，它们是：

1) pn结——p型（以正电荷空穴作为导电的主要载流子）和n型（以电子为主要载流子）半导体薄层或微区在原子尺度上的紧密结合体；p层和n层为同种材料者叫同质结，为不同材料者叫异质结。例如p型硅与n型硅的结合是同质结，p型砷化镓与n型硅的结合则为异质结。构成电力电子器件的pn结大多数是同质结。pn结的基本特征是单向导电性，即当p端比n端电位高时，电阻

极低，反之电阻极高。

2) 金属-半导体 (MES) 肖特基势垒接触——有选择的金属薄层与半导体表面的紧密接触，具有类似于 pn 结的单向导电性。这种金属-半导体接触与仅起电流引出作用的电极接触有本质区别。电极接触为欧姆接触，具有线性伏安特性，且电阻极小。欧姆接触不产生任何器件特性，在任何器件中所起作用相同，所以器件构成元素中的金属-半导体接触单指具有单向导电性的 MES 接触。

3) 金属-氧化物-半导体 (MOS) 系统——半导体硅表面经氧化处理后再淀积一层金属薄膜构成的三层系统，例如 Al-SiO₂-Si 系统。MOS 结构的基本特征是可以透过金属膜电位的变化改变氧化层下半导体表层的导电极性和电导率。

目前，在结构或功能上有明显区别的 200 余种各式各样的半导体器件，包括电力电子器件，皆主要由这三种构成元素之中的一种或两种构成。其中，pn 结是这三种构成元素中最重要的一种。有很多器件完全由 pn 结构成，而以 MES 或 MOS 为主要结构元素的器件也往往同时包含有 pn 结元素。

1.1.2 电力电子器件的分类及特点

电力电子器件按功能分为整流和开关两大类，按基本工作原理分为单极型器件、双极型器件和复合型器件三大类。这里的“极”指载流子的极性，而非电极。因此单极型器件指仅由一种载流子 (n 型半导体中的电子或 p 型半导体中的空穴，即多数载流子) 导电的器件，双极型器件指额外载流子 (热平衡统计数之外的载流子) 也参与导电，而且对器件特性会产生重要影响的器件。一般情况下，额外载流子主要对半导体中少数载流子 (n 型半导体中的空穴，p 型半导体中的电子，简称少子) 的密度有明显改变，因而有些文献称双极型器件为少子器件，称单极型器件为多子器件。由于额外载流子的参与，双极型器件中电流通过的区域具有随电流大小而变化的电阻，其理想状态下的正向伏安特性在电流较大时具有指数特征，即电流激烈升高时电压增量不大。此即电导调制效应。有无电导调制效应是单、双极型器件的主要区别。

双极型器件完全以 pn 结作为基本构成元素，其电导调制效应来源于 pn 结正向导通时的额外载流子注入。如图 1-1 所示，只含一个 pn 结的器件叫 pn 结二极管，是最简单也最典型的双极型器件。由两个 pn 结串联而成的三层三端器件

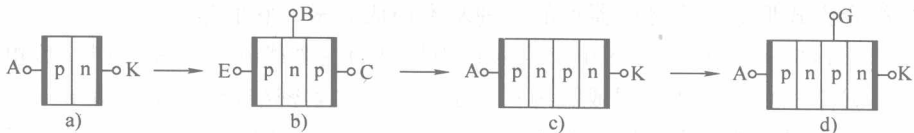


图 1-1 主要的双极型电力电子器件构造示意图

a) pn 结二极管 b) 晶体管 c) 两端子双向开关 d) 晶闸管

叫双极结型晶体管 (BJT), 简称晶体管。由三个 pn 结串联起来的四层器件有两种。其中, 只有阴 (K) 阳 (A) 两极的叫两端双向开关 (Diac); 增加一个电极 G (门极), 因而可等效为一个 pnp 晶体管和一个 npn 晶体管相串联的器件即晶闸管 (Thyristor), 简称晶闸管。晶闸管是一个器件大家族, pnpn 四层结构是其共同的主要特征 (个别除外)。

最典型的单极型器件是肖特基势垒二极管 (SBD) 和金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)。如图 1-2a 所示, SBD 的基本构成就是 MES 本身。但是, 将 pn 结结合进去可以使 SBD 的性能获得很大改善, 这样做成的 SBD 叫 JBS (Junction Barrier SBD) 或 MPS (Merged pn Junction SBD)^[1], 其结构示

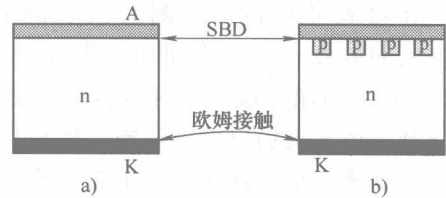


图 1-2 普通 SBD 和带 pn 结的 SBD
a) 普通 SBD b) 带 pn 结的 SBD

意如图 1-2b 所示。JBS 和 MPS 虽然都是 SBD 和 pn 结 (见图 1-2b) 的复合, 但其设计参数和工作原理各不相同。JBS 利用反偏 pn 结的空间电荷区为 SBD 承受较高反向偏压, 从而可使其适当降低肖特基势垒, 以保持较低的正向压降。该复合结构的设计要点是要保证相邻 pn 结的空间电荷区在反偏压下能够迅速接通, 从而在阴、阳极间形成比肖特基势垒更高更宽的 pn 结势垒, 以承受较高反向电压。正向偏置时, 由于 SBD 的开启电压比 pn 结低, 正向电流将通过肖特基势垒接触走 pn 结之间的 SBD 通道, 因而正向压降较低, 尤其是在有意识地削减了肖特基势垒高度之后。MPS 的设计目标和设计方法都与 JBS 不同, 其目标在于引进 pn 结的电导调制作用, 以降低 SBD 在高密度正向电流下的压降。这主要是针对高耐压 SBD, 因为高压 SBD 的漂移区较宽, 电阻率较高, 以至于电流稍一增大, 其压降就会升高很多。另一方面, MPS 创意也只能针对高耐压 SBD, 因为只有电阻率较高的漂移区才能在电流密度较高时使 pn 结上的电压超过其开启电压而进入导通状态, 对高阻漂移区产生电导调制。因此 MPS 正向导通时, 其低电流密度下的伏安特性仍保持 SBD 的低压降特征, 而高电流密度下, 则具有类似于 pin 结的伏安特性, 其正向压降在电流密度升高时增量不大。

MOSFET 的基本结构如图 1-3 所示。其主要构成元素是 MOS 系统, 但 pn 结也是其必不可少的构成元素, 否则源 (S)-漏 (D) 之间不能形成必要的隔离, 以保持常关状态。在这种器件中, MOS 系统犹如一个平板电容器。对图 1-3a 所示的由 n 型半导体构成的 MOS 系统, 当金属栅电极所加电压 (栅压 G) 为负时, 电容器的电荷收集效应使 SiO_2 介质层下聚集空穴, 从而使 n 型半导体的表层反型为 p 型, 在两个本无导电连接的 p 区之间形成一个可受栅压灵活控制的导电沟道, 实现对器件源-漏极间通断状态的电压控制。这种器件被称为 p 沟道 MOS-

FET。同样，把用 p 型半导体构成的 MOS 系统应用在两个本无导电连接的 n 区之间，即可形成 n 沟道 MOSFET，如图 1-3b 所示。图 1-3 所示器件的源-漏电极皆处于同一表面，称为平面型 MOSFET。在电力电子电路中，作为功率开关使用的功率 MOSFET（简称功率 MOS）采用类似于图 1-4a 所示的纵向结构，但其栅极结构及其开关原理与平面型 MOSFET 相同。

在功率 MOS 的漏极侧加一个 pn 结，即在其漏电极与 n 区之间加一个 p 型层，利用 pn 结的额外载流子注入效应对处于导通状态的 n 区加以电导调制，提高其电导率，则该新结构器件兼有单极型器件输入阻抗高和双极型器件导通电阻低的优点。这就是复合型器件的典型——绝缘栅双极型晶体管（IGBT），如图 1-4b 所示。

纯 pn 结也可构成单极型器件，例如 SIT（静电感应晶体管），如图 1-5a 所示，这是一个与功率 MOS 不同的常开型电子开关。当 p 型微区与 n 型材料之间的所有 pn 结同时加上反向偏置电压时，这些反偏 pn 结的空间电荷区扩展相连，就会把阴-阳极间的电流通路夹断，将器件关断。

作为单极型器件中的 pn 结，无论是在 MOS 还是 SIT 中，它被利用的都是反偏置状态下的电压阻断作用，其额外载流子注入作用在这里无法发挥。但当其中有 pn 结的正向偏置状态可被利用时，单极型器件就变成了复合型器件。例如，在 SIT 的阳极与 n 漂移区之间也加一个 p 型层形成 pn 结，利用该 pn 结的额外载流子注入效应产生电导调制，则该新结构器件就能够输运高密度电流。称这种器件为 SITH（静电感应晶闸管），如图 1-5b 所示。

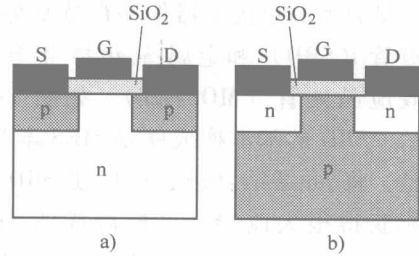


图 1-3 p 沟道和 n 沟道平面 MOSFET
a) p 沟道 MOSFET b) n 沟道 MOSFET

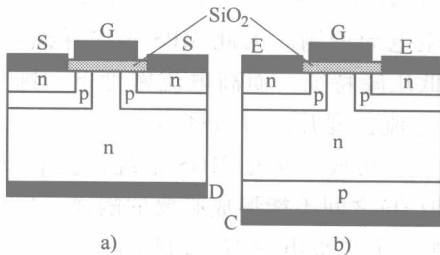


图 1-4 功率 MOS 和 IGBT 结构示意图
a) 功率 MOS b) IGBT

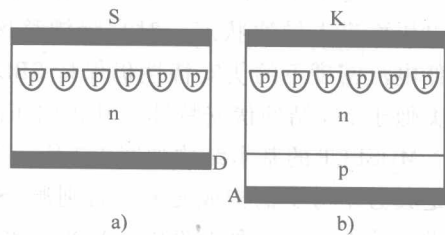


图 1-5 SIT 和 SITH 结构示意图
a) SIT b) SITH

1.2 发展沿革与趋势

在 20 世纪 50 年代中期之前,在电力系统中起整流和开关作用的有源电子器件主要是真空管和离子管等电真空器件。尽管金属-半导体接触的整流效应早在 20 世纪初叶即已为人所知,并在二战时期投入实际应用(雷达检波),具有电流开关和放大作用的晶体管也已在 40 年代末期发明,并很快投入实际应用(助听器);但这些有源器件的功率都很小,主要用于信号处理。直到 1958 年前后,随着功率 BJT 和晶闸管的问世和应用,电力电子技术才开始了从以电子管为基础到以半导体器件为基础的转变。在随后的 20 来年中,晶闸管及其派生器件在功率处理能力和开关频率方面的不断改善,发挥了半导体器件相对于电真空器件体积小、能耗低的超强优势,对电力电子系统缩小体积、降低成本起到了极其关键的作用。然而,这些电流控制型器件需要有相当大的功率输入,其控制电路因需要使用分立元器件而变得很复杂,从而阻碍了电力电子系统体积和成本的进一步缩小。同时,普通晶闸管只能控制导通而不能控制关断,且开关频率相对较低,处于这个阶段的电力电子技术相对来说还比较幼稚,应用领域相对较窄。

自 20 世纪 70 年代中期起,各种通、断两态双可控的大功率开关器件逐渐开始推广应用。与普通晶闸管的强制过零关断方式不同,这类器件可用较小的控制电流(门极电流)或控制电压(栅压)令其关断,因而称为自关断器件。

电流控制型自关断器件的典型产品是电力晶体管(Giant Transistor, GTR, 若采用达林顿结构,亦称大功率达林顿晶体管)和门极关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor, GTO 晶闸管)。GTO 晶闸管一直是功率容量(阻断电压与通态电流之积)最高的自关断器件,在同等功率容量的晶闸管及其派生器件中工作频率最高,并具有较高的 du/dt 耐量。但其门极驱动功率也大,驱动电路比较复杂,且关断过程中电流分布的均匀性差。GCT(Gate Commutated Thyristor, 门极换向晶闸管)从结构到工作原理都与 GTO 晶闸管十分相似,最多可算是在 GTO 晶闸管基础上派生出来的一种自关断晶闸管,其特点是阳极电流在关断时向门极换向的时间较普通 GTO 晶闸管短,其高频特性有较大的改善。因此可以说, GTO 晶闸管之后没有再出现过新概念的电流控制型电力电子器件。

电压控制型自关断器件的早期典型产品是 SIT 和功率 MOS。这类器件,特别是功率 MOS 及其基础上发展起来的复合型器件 IGBT 的兴起,使电力电子技术逐渐走向成熟。电压控制型自关断器件的主要特点是输入阻抗很高,只需要极小的稳态输入电流即可实现器件的开关,不但开关过程的消耗功率低,而且很容易实现与控制电路的单片集成。因此以功率 MOS 为基本器件的电力电子

系统的功能大大增强，而体积却大为缩小、成本大为降低。同时，功率 MOS 之类的电压控制型器件还有一个更大的特点，就是其导通过程中没有额外载流子的参与，因而其通断状态的转换过程很快，不会像 GTR 和 GTO 晶闸管之类的双极型器件那样因额外载流子的产生与消失需要一定时间而延迟。这类器件的高频特征，使计算机开关电源这样的功率不太高的电力电子系统获得很大的性能改善。人们因此曾期望功率 MOS 在所有 GTR 的应用领域将其取而代之。

但是，额外载流子的缺失也给功率 MOS 这一类单极型器件带来了通态电阻较高，因而导通过程中的稳态功耗较大的问题，特别是对额定阻断电压超过 300V 的器件。GTR 和 GTO 晶闸管这一类电流控制的双极型自关断器件，跟普通晶闸管和普通 pn 结整流器一样，因电导调制效应而使通态电阻很低。单极型器件无电导调制效应之益可受，因而其通态压降明显高于相同电压等级的双极型器件。功率 MOS 最终只在低压电力电子装置中成功取代了 GTR。

不过，功率 MOS 问世之后大约 10 年，将功率 MOS 的触发原理同双极器件的导通原理有机结合起来的一类新型电力电子器件被迅速推向市场，并很快在高压应用领域开始取代功率 BJT 和晶闸管。IGBT 即是这一类器件的典型。IGBT 利用 MOS 栅赋予 BJT 以高输入阻抗，利用 pn 结的电导调制效应降低通态电阻，加上其优良的电流饱和能力和极优异的安全工作区，非常适合在高频大电流电力电子系统中应用。目前，除特大功率应用场合还在继续使用传统晶闸管和 GTO 晶闸管外，大多数电力电子系统和装置都改用功率 MOS 和 IGBT 之类的现代电力电子器件，即便是像电车和电力机车这些原本专属 GTO 晶闸管的大型牵引装置，高压大电流 IGBT 也正在逐渐取而代之。

MOS 控制的晶闸管 (MOS-Controlled Thyristor, MCT) 曾被认为是能够取代 GTO 晶闸管的场控双极型电力电子器件。这种器件将 MOS 栅应用于晶闸管 (或 GTO 晶闸管)，而且不仅用其实现晶闸管的开通，也用其实现晶闸管的可控关断。由于保留了晶闸管的双向导调制，MCT 的通态电阻几乎不随额定阻断电压的提高而增大。不过，由于 MCT 结构复杂，性能对工艺精度的依赖性太大，其开发虽与 IGBT 同时起步，但至今未能实现真正意义上的商品化。究其原因，跟 IGBT 超乎预料的高压大电流化有很大关系。在取代 GTO 晶闸管的可能性方面，当初谁也没有料到 IGBT 会捷足先登。

不过，MCT 的设计理念还是给予了人们很多改造 GTO 晶闸管的启发。首先，GTO 晶闸管的门极驱动电路从使用 BJT 改为使用功率 MOS。随后，为了避免 MCT 将 MOS 与 GTO 晶闸管实行单片集成的困难，采用混合集成电路 (Hybrid Integrated Circuit, HIC) 技术将 GTO 晶闸管集成在使用功率 MOS 的门极驱动电路印制板上。这种混合集成电路按门极驱动电路的不同分别称为 ETO (Emitter Turn-off Thyristor, 发射极关断晶闸管) 和 MTO (MOS Turn-off Thyristor, MOS 关

断晶闸管)。类似的产品还有 IGCT (Integrated GCT, 集成门极换向晶闸管), 它是 GCT 与其门极驱动电路的混合集成。因此, ETO、MTO 以及 IGCT 事实上并非传统概念上的器件或模块 (Module), 也非真正意义上的集成电路。这些改进产品, 是在 IGBT 高压大电流化的可行性尚不清晰, 而 MCT 又迟迟不能商品化的时期推出来的, 其生命力可想而知。

IGBT 问世之后大约 10 年, 碳化硅和氮化镓等宽禁带新型半导体材料的研发进展引起了电力电子器件专家们的注意, 因此产生了对宽禁带半导体电力电子器件的兴趣。这是因为硅工艺的长足进步已使硅器件的性能在很多方面都逼近了它的理论极限, 继续像前 40 年这样通过器件原理的创新、结构的改善及制造工艺的进步来提高电力电子器件的总体性能, 已没有太大发展空间。更大的、突破性的提高, 只能从器件制造材料的改弦更张中寻找出路。与其他半导体器件相比, 电力电子器件以承受高电压、大电流和耐高温为其基本特点, 这就要求其制造材料要有较宽的禁带、较高的临界雪崩击穿电场强度和较高的热导率等。譬如, 我们将在后面证明, 功率 MOS 的通态比电阻与制造材料的禁带宽度或临界雪崩击穿电场强度的三次方成反比。硅材料的禁带宽度只有碳化硅的 $1/3$ 左右, 因而恰恰在电力电子器件的关键要求上逊色于碳化硅之类的宽禁带半导体。基础研究表明^[2], 使用碳化硅制造的电力电子器件, 可在硅器件无法承受的高温下长时间稳定工作, 其最高工作温度有可能超过 600°C , 远高于硅器件的 115°C 。作为一种典型的宽禁带半导体, 碳化硅不但禁带宽, 还具有击穿电场强度高、载流子饱和漂移速度高、热导率高、热稳定性好等特点。理论分析表明, 用 6H-SiC 或 4H-SiC 制造功率 MOS, 其通态比电阻 (单位面积器件的通态电阻) 可能分别只有同等等级硅功率 MOS 的 $1/100$ 和 $1/200$, 而工作频率却提高 10 倍以上^[3]。这就是说, 如果用碳化硅制造没有电导调制效应的单极型器件, 在阻断电压高达 10kV 的情况下, 其通态压降仍然会比具有极强电导调制效应的硅双极型器件 (譬如硅晶闸管) 还低, 而单极型器件的工作频率要比双极型器件高得多。

使用宽禁带半导体也更容易实现输变电技术对电力电子器件的耐高压要求, 譬如制造阻断电压很高的 pin 二极管和晶闸管等。按理论计算, 设计一个单管反向阻断电压高达 25000V 的碳化硅 pin 二极管, 其 n^{-} 区杂质浓度只须低到 $5 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, 厚度只要 0.2mm , 少子寿命为 $20\mu\text{s}$ 。如果用硅做一个同样的器件, 则其 n^{-} 区的杂质浓度须低达 10^{12}cm^{-3} , 厚度至少要 2mm , 少子寿命须高达 $400\mu\text{s}$ 。显然, 对硅的要求是不现实的, 而对碳化硅的要求则不难实现。因此包含微波电源在内的电力电子技术有可能从碳化硅、氮化镓等宽禁带材料的实用化中得到的好处, 就不仅是整机性能的改善, 也有整机体积的大幅度缩小, 以及对工作环境的广泛适应性。

在全面开展碳化硅电力电子器件研发工作大约 10 年之后, 碳化硅肖特基势垒二极管首先揭开了在电力电子技术领域宽禁带半导体电力电子器件替代硅器件的序幕。现在, 不但有耐压最高 1200V、电流最大 20A 的 SiC 肖特基势垒二极管系列产品出售^[4], 耐压 600V 的 GaN 肖特基势垒二极管也已由 Velox 公司首先推入市场^[5]。这些器件都具有反向漏电流极小、几乎没有反向恢复时间等明显优点; 其高温特性也非常好, 从室温到由借用管壳限定的 175℃, 其反向漏电流几乎没有什么增加。若能采用耐高温的专用管壳, 这些器件的实际工作温度可以超过 300℃。目前, 许多公司已在其 IGBT 变频或逆变装置中用碳化硅肖特基势垒二极管替代硅快恢复二极管, 取得提高工作频率、大幅度降低功率损耗的明显效果, 其总体效益远远超过这些器件与硅器件之间的价格差异造成的成本增加。

总而言之, 现代电力电子器件的主流发展方向可归结为两点: 一是加速开发宽禁带半导体电力电子器件, 并同时考虑宽禁带半导体电力电子电路的集成化; 二是进一步改进硅器件的结构及其制造工艺, 以适应系统集成的需要, 同时开发更适合于集成化的新型元器件, 包括像无磁心平面变压器这样的无源元器件。

参 考 文 献

- [1] 施敏. 现代半导体器件物理 [M]. 刘晓彦, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] Baliga B J. Power semiconductor device figure of merit for high frequency applications [J]. IEEE Electron Dev. Lett. 1989, ED-10: 455.
- [3] Baliga B J., High voltage silicon carbide devices [C]. Proc. MRS Symp., 1998, 512: 77-89.
- [4] 公司网页 www.cree.com 和 www.infineon.com.
- [5] Chou P T. Invited talk in ICMAT 2005.

第2章 电力电子器件基础

人们通常所说的电力电子器件，是指在电力电子电路中起整流或开关作用的有源电子器件。半个世纪以前，这些器件主要是利用电真空技术制造的真空管；目前，这些器件绝大多数是用半导体材料制造的固体器件。顾名思义，各种电子器件的功能都是通过电子的运动来实现的。但是，半导体中的电子和真空中的电子运动形态和规律各不相同。本章的目的在于帮助不具备半导体专业背景的读者在认识和了解宽禁带半导体电力电子器件之前，理解电力电子器件的工作原理和基本特性，已具备半导体物理和半导体器件物理基础的读者可以不阅读本章内容。

2.1 半导体物理基础

众所周知，目前所用的电力电子器件绝大多数都是用半导体材料制造的。那么，什么是半导体呢？一般情况下，人们顾名思义地用电阻率的高低来区分导体、半导体和绝缘体，把电阻率在 $10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的固体材料称为半导体。这其实是不够准确的。某些结构完整且不包含杂质，或杂质浓度极低的结晶态半导体，以及大多数未掺杂的非晶态半导体，也会具有跟绝缘体不相上下的高电阻率；而当它们含有足够高浓度的某些特殊杂质时，其电阻率又会下降到金属的电阻率范畴，甚至比某些导电性欠佳的金属的电阻率还低。这种现象被称为电阻率的结构与组分敏感性。这种特点对于作为本书中心议题的宽禁带半导体尤其明显。最典型的例子就是具有很宽禁带（ $\sim 5.5\text{eV}$ ，约为硅禁带宽度的5倍）的金刚石。在过去的很多专著和教科书中，金刚石被称为绝缘体，而现在已被普遍认同为半导体。不仅是金刚石，所有宽禁带半导体在不含杂质的情况下都是高阻如同绝缘体，而在浓度足够高时又是低阻如同良导体。在这两个极端之间，其电阻率随着掺杂浓度的升高而连续下降。除此之外，半导体的导电能力还与某些外部条件有关。与金属和绝缘体相比，半导体的电阻率对环境温度、光照，乃至磁场和电场等外加条件的敏感性要强得多。因而从本质上说，半导体是导电性明显取决于材料的内外状态，因而可以灵活改变的一类特殊物质。正是由于这样一种灵活多变的特点，半导体才可以用来制造像晶体管、晶闸管那样的电子器件，而导电性难以明显改变的金属和绝缘体却不能。半导体物理就是研究和揭示半导体的这些特殊性质及其物理内涵的学问，因此