

袁寿财 著



IGBT场效应 半导体功率器件导论



科学出版社
www.sciencep.com

IGBT 场效应半导体 功率器件导论

袁寿财 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以新一代半导体功率器件 IGBT 为主线,系统地论述了场效应半导体功率器件的基础理论和工艺制作方面的知识,内容包括器件的原理、模型、设计、制作工艺及应用等,重点讨论 IGBT,同时对其他器件如 VDMOS、CoolMOS 等也作了简单介绍。本书着重阐述基础理论,并适当吸收该领域近期的研究报道,各章后附有相关参考文献,书后还附有全书统一使用的符号表。

本书可作为高等院校电子科学与技术专业、微电子与固体电子学专业的教学用书,也可供从事物理专业及电子信息专业领域的教师、科研人员、研究生和本科生等参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

IGBT 场效应半导体功率器件导论/袁寿财著. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-020041-9

I. I… II. 袁… III. 绝缘栅场效应晶体管-基本知识 IV. TN386.2
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 168691 号

责任编辑: 王志欣 孙 芳 于宏丽/责任校对: 鲁 素
责任印制: 刘士平/封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)
2008 年 1 月第一次印刷 印张: 14
印数: 1—3 000 字数: 256 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

序

半导体功率器件是电力电子领域的重要元器件，是实现强电与弱电之间接口的桥梁。在开关电源、变频、显示、节能降耗及生态与环境保护等方面均有广阔的应用前景。MOS型半导体功率器件是在半导体双极功率晶体管的基础上发展起来的，而双极功率晶体管的前身是半导体功率整流器，是为解决电子领域面临的功率放大与功率控制需要开发出来的，而且，随着功率电子技术的不断发展壮大产生了功率电子学这种新的学科分支。

以IGBT、VDMOS为典型代表的MOS半导体功率器件是如今电力电子器件领域的主流，而IGBT又是其中最具革命性的器件。《IGBT场效应半导体功率器件导论》一书以IGBT场效应半导体功率器件为主导，系统地论述了该器件的基础理论，内容包括器件的原理、模型、设计、制作工艺及应用等，重点讨论IGBT，同时也对VDMOS、CoolMOS等器件作了简单介绍。

该书作者是国内从事电力电子器件研究、制作和教学的专业人员之一，曾在陕西微电子学研究所军工预研项目组参与设计制作IGBT器件，以解决我国军工对该种器件的急需状况，也是西安电力电子技术研究所承担的国家“八五”攻关“IGBT研究”的项目负责人之一。主要研究成果包括授权IGBT国家发明专利一项，在国际国内重要期刊上发表学术研究论文20余篇。

该书是作者长期从事本专业教学和研究的成果结晶，视角新颖，结构合理，内容丰富，文笔简明，图表清晰，公式推导准确，具有很强的可读性和易懂性。该书有助于读者开阔眼界，激发读者在相关领域开拓创新的兴趣。我相信不同知识层次、不同专业的大专院校师生及企事业工程技术人员都可以从中获取有益的启迪和参考。我愿意向广大读者引荐这本书，是为序。



2007年2月13日

于西安

前 言

以 IGBT、VDMOS、CoolMOS 为标志的 MOS 型半导体功率器件是当今电力电子领域器件的主流，其中，最具代表性的器件 IGBT 发明于 1982 年。这类器件是由栅源电压控制导通或截止的纵向（垂直）导电型器件，其单芯片主要电性能参数指标（如漏源极电压/电流）超过 200V/1A 的范围。用平面或槽栅（trench gate）硅栅工艺制作，并具有元包（cell）版图设计、场限环、场板等平面型终端结构的特点。

本书的主要内容可分为三大部分：基础理论、器件模型、器件设计和制作工艺。基础理论的内容在第 2、3 章中体现，主要对 IGBT 的器件结构和工作原理作一系统介绍。器件模型在第 4~6 章中讨论，是本书的重点内容，涉及了两种应用最为广泛的 IGBT 器件模型。一种是准数值分析模型，把 IGBT 的高阻厚外延层连同衬底与表面连接视为 PIN 二极管结构进行分析，给出物理意义明确、简单易算的分析结果。一种是等效电路模型，提出了用电压控制电阻（VCR）等效 IGBT 高阻厚外延层的电导调制电阻的等效电路结构，与现有 SPICE 等器件模拟软件兼容，建立了模型参数非破坏提取的系统理论，并对模型参数的计算进行了全面的优化，模型参数提取简单、准确。用实际 IGBT 样品对该模型的直流、开关和温度等特性作了测试对比和全面验证，得到较为满意的结果。本书建立的 IGBT 准数值分析和等效电路模型对 IGBT 的性能分析、设计优化和系统调试具有一定的指导作用和实用价值，是实现电力电子系统自动化设计和调试的辅助工具。器件设计和制作工艺部分在第 7~9 章中介绍，主要讨论了目前广泛应用的平面工艺和极具发展潜力的 Trench 工艺，通过器件结构和工艺的优化设计制作出符合设计要求且性能优良的 IGBT 器件是最终目标，系统论述了 pn 结雪崩击穿的基础理论和各种平面终端技术。

感谢朱长纯先生近二十六年的教诲及对本书写作的悉心指导。感谢母亲贾学田、父亲袁贵文的生养之恩。感谢妻子刘亚媚、女儿袁亦方的鼓励和支持。感谢赣南师范学院学术著作出版基金对本书出版的资助。

由于作者水平所限，书中不妥之处在所难免，希望广大读者提出宝贵的批评和改进意见。

袁寿财

2007 年 3 月

目 录

序

前言

| | |
|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 半导体功率器件与电力电子技术 | 1 |
| 1.2 半导体功率器件及其主要应用领域 | 3 |
| 1.3 电力电子与民族工业的振兴 | 5 |
| 1.4 本书的主要内容和章节安排 | 6 |
| 第 2 章 半导体功率器件技术回顾 | 8 |
| 2.1 引言 | 8 |
| 2.2 双极结型晶体管 (BJT) 技术 | 8 |
| 2.3 场效应晶体管 (FET) 技术 | 12 |
| 2.4 MOSFET 的发展历程 | 16 |
| 2.5 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) | 20 |
| 2.6 其他半导体功率器件 | 23 |
| 2.7 半导体新材料和新器件 | 27 |
| 2.8 IGBT 等半导体功率器件的应用 | 29 |
| 2.9 小结 | 33 |
| 参考文献 | 33 |
| 第 3 章 IGBT 的工作机理分析 | 39 |
| 3.1 引言 | 39 |
| 3.2 IGBT 的基本结构及输出 $I-V$ 特性 | 39 |
| 3.3 IGBT 工作机理的数值分析 | 43 |
| 3.4 IGBT 重要电性能参数的分析和优化设计 | 47 |
| 3.5 小结 | 66 |
| 参考文献 | 67 |
| 第 4 章 IGBT 准数值分析模型 | 69 |
| 4.1 引言 | 69 |
| 4.2 IGBT n^- 区压降计算的准数值模型 | 70 |
| 4.3 IGBT n^- 区压降计算的 PIN 二极管模型 | 74 |
| 4.4 IGBT 样品测量与模型计算的比较 | 78 |

| | |
|--|------------|
| 4.5 小结 | 80 |
| 参考文献 | 80 |
| 第 5 章 IGBT 的等效电路模型 | 82 |
| 5.1 引言 | 82 |
| 5.2 IGBT 等效电路的建立 | 82 |
| 5.3 IGBT n^- 区电阻的 VCR 模型 | 86 |
| 5.4 IGBT 等效电路模型参数的非破坏测试和提取 | 87 |
| 5.5 模拟与测量的比较与讨论 | 94 |
| 5.6 小结 | 96 |
| 参考文献 | 97 |
| 第 6 章 IGBT 的开关特性和温度效应 | 99 |
| 6.1 引言 | 99 |
| 6.2 IGBT 关断特性的分析 | 101 |
| 6.3 IGBT 温度效应的分析 | 106 |
| 6.4 小结 | 113 |
| 参考文献 | 114 |
| 第 7 章 平面工艺 IGBT 设计与制作 | 116 |
| 7.1 引言 | 116 |
| 7.2 半导体功率器件的衬底材料 | 116 |
| 7.3 平面工艺 IGBT 设计与制作 | 124 |
| 7.4 全自对准浅结平面工艺 IGBT 设计 | 128 |
| 7.5 制作芯片的测试与结果分析 | 139 |
| 7.6 小结 | 146 |
| 参考文献 | 146 |
| 第 8 章 Trench Gate (槽栅) IGBT 结构和工艺 | 148 |
| 8.1 Trench 工艺的提出 | 148 |
| 8.2 Trench 工艺的发展 | 148 |
| 8.3 Trench 的几种结构 | 152 |
| 8.4 Trench 结构的优势与不足 | 157 |
| 8.5 难熔金属硅化物工艺 | 161 |
| 8.6 全自对准 Trench Gate IGBT 结构与工艺设计 | 164 |
| 8.7 电力电子新器件与新工艺 | 168 |
| 8.8 小结 | 172 |
| 参考文献 | 172 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 第 9 章 pn 结击穿与终端保护技术 | 175 |
| 9.1 碰撞电离与雪崩击穿 | 176 |
| 9.2 击穿电压与 IGBT 纵向参数的关系 | 179 |
| 9.3 临界电场 | 183 |
| 9.4 结果分析与优化 | 184 |
| 9.5 带缓冲层的穿通型器件结构 | 188 |
| 9.6 击穿电压与掺杂浓度及厚度关系对 IGBT 的修正 | 190 |
| 9.7 pn 结平面终端技术 | 191 |
| 参考文献 | 206 |
| 主要符号表 | 208 |

第 1 章 绪 论

1.1 半导体功率器件与电力电子技术

半导体功率器件是电力电子系统进行能量控制和转换的基本电子元器件，电力电子技术的不断发展为半导体功率器件开拓了广泛的应用领域，而半导体功率器件的可控制特性决定了电力电子系统的效率、体积和重量。实践证明，半导体功率器件的发展是电力电子技术更新的关键。通常，半导体功率器件是一种三端子器件，通过施加于控制端子上的控制信号，控制另两个端子处于电压阻断（器件截止）或电流导通（器件导通）状态。20 世纪 50 年代初，世界上第一只可控型半导体器件双极结型晶体管（BJT）诞生，从那时起，BJT 开始广泛应用于各类电子系统中，并促使人类真正进入大功率电能转换的时代。

第一只工业用普通晶闸管是 1957 年由美国通用电气（GE）公司研制的，它标志着电力电子技术开始进入由电力电子器件（晶闸管）构成的电能变换和控制的变流器时代。从此，以功率变换器为核心的电力电子变换装置几乎应用于现代工业的各个领域，标志着现代电力电子技术的诞生。进入 20 世纪 70 年代，不能自关断的普通晶闸管开始形成由低电压小电流到高电压大电流的系列产品。在此期间的几十年间陆续开发和研制出了双向、逆导、非对称等晶闸管结构，如今这些晶闸管系列产品仍是特大功率应用（如高压输电等系统）的主体。随着电力电子技术理论研究和制造工艺水平的不断提高，器件结构和工艺的不断改进与更新，器件推陈出新，新器件不断涌现。先后研制出的 GTO、GTR 等自关断的双极型半导体功率器件，不像传统的 SCR 必须通过阴、阳极电压极性反向才能关断，GTO 是栅控可关断型器件，给应用带来了极大的方便。自 1964 年第一次试制成功了 0.5kV/0.01kA 的 GTO 至今，单管功率容量也不断增大，目前该器件已达到 9kV/2.5kA/0.8kHz 及 6kV/1kHz 的水平，是现有各种自关断型器件中容量最大的，但其工作频率低，驱动电路复杂，仅在大功率电力牵引驱动领域尚有一席之地。

双极型（如 BJT、GTO 等）半导体功率器件是电流控制型器件，在一定的击穿电压下，简化基极驱动电路、提高器件的电流放大倍数是器件设计的主要目标。然而，由于器件的电流放大倍数和击穿电压对基区宽度和集电区、漂移区厚度的要求是彼此矛盾的，所以，设计中，在放大倍数和击穿电压之间必须取一个折中。

20 世纪 70 年代末, 随着 MOS 集成电路的发展, 诞生了 MOS 型半导体功率器件。功率 MOS 是电压控制型器件, 通过栅极电压控制器件的关断或开通, 与 BJT 等双极型器件相比, 极大地简化了输入驱动线路, 同时更容易实现电力电子系统的集成化。而且, 对于击穿电压小于 200V 的器件, 可以通过增大单位面积的沟道宽度使导通电阻和开通损耗降到最小, 此外, 功率 MOS 还具有更高的开关速度和更宽的安全工作区 (SOA), 这使得功率 MOS 在低压、高频系统中得到广泛的应用。但是, 由于没有类似双极器件的少数注入产生的电导调制效应, 随着器件击穿电压增大 (大于 200V), 其导通电阻急剧增大, 极大地限制了功率 MOS 击穿电压的提高, 也限制了它在高压系统中的使用。80 年代初, 试图把 MOS 与 BJT 技术集成起来的研究导致称为绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 的新型功率器件的发明。IGBT 集 MOSFET 的栅极电压控制特性和 BJT 的低导通电阻特性于一身, 具有电压控制、输入阻抗大、驱动功率小、导通电阻小、开关损耗低及工作频率高等特点, 并具有类似 MOSFET 的宽 SOA 特性, 是近乎理想的半导体大功率开关器件, 有着广阔的发展和前景。正因为如此, IGBT 迅速从研究进入商用化, 广泛应用于中、大功率的电力电子系统中。

功率 MOSFET、IGBT 工艺水平的提高和额定电压、电流指标的增大, 标志着电力电子向着大容量、高频率、快响应、低损耗方向发展。理论分析和实验研究表明, 电气产品的体积与重量的缩小与供电频率的平方根成反比, 故电力电子器件的高频化始终是技术发展的主导方向。器件工作频率的提高, 可使电气设备在制造中节省材料, 在运行时节约能源, 设备的系统性能也大为改善, 尤其是对国防及航天工业具有十分深远的意义。进入 20 世纪 90 年代, 电力电子器件则朝着产品标准化、结构模块化、功能复合化、功率集成化、性能智能化的方向发展。目前, 先进的模块已经包括开关元件和反向续流二极管及驱动保护电路等多个单元, 并已实现产品标准化和系列化, 在电性能一致性与可靠性上也达到了极高的水平。

20 世纪 80 年代末, 商品化的 IGBT 单管水平已达到 20~50A/80~1000V。由于器件结构的改进、参数的调整以及工艺水平的提高, 到 90 年代初期, IGBT 模块已达到 300A/500~1200V 的水平。如今, IGBT 模块已经有 800A/6500V、1000A/4500V、1200A/3300V、2400A/1800V 的系列产品。

以 IGBT 为代表的现代电力电子器件和相关产品, 以其独特的、不可取代的特殊功能, 在工业、能源、交通等用电的场合发挥着日益重要的作用, 是机电一体化设备、新能源技术、节能技术、超导和激光技术、空间和海洋技术、军事技术、生物技术、材料、机械加工、以磁悬浮列车为代表的先进交通运输工具、电动车辆、办公自动化及家用电器等实现高性能、高效率、轻量小型的技术基础, 标志着电力电子器件和装置开始向绿色节能、轻巧、灵活、智能的方向迈进。

1.2 半导体功率器件及其主要应用领域

在与时俱进、创新未来的思想指引下，可以肯定的说，在 21 世纪的国家发展中，技术创新将是企业发展的主要内容，建立与发展适合我国国情的电子工业的技术创新机制，通过电力电子技术发展推动我国电子工业不断升级和进步进而走向世界则是我们的发展目标。

IGBT 等半导体功率器件具有微电子技术的许多特征，而半导体的微细加工技术及其发展变化总是非常迅速，渗透力和创新表现十分突出，并与其他学科相互融合产生出新的发展机遇，如太阳能发电、风力发电、潮汐发电等绿色能源的变换。而电力电子技术还有其自身一些独具特色的地方，如高频、大容量及控制功率范围大等，因此，技术创新的难度还在于必须跨越高频、高压和大功率这一关卡，并在材料工业和制造工艺等领域取得重大突破。另外，电力电子器件运行的可靠性也是极其重要的一个技术指标。因此，电力电子领域的技术创新是多种学科相互融合并对多种工业领域有着极强的渗透性，与国家的基础工业水平密切相关，符合国家发展的各项方针及产业政策，是国家 21 世纪可持续发展战略纲领的重要组成部分。在 21 世纪伊始，加大我国对现代电力电子器件研究与开发的力度，必将形成一条高科技产业链，带动我国电子工业的技术创新和民族工业的发展。

半导体功率器件及其制造工艺的技术创新，已成为世界各国工业控制自动化和机电一体化领域竞争最激烈的阵地。各发达国家均在这一领域注入极大的人力、物力和财力，力争赶超该领域技术发展的最前沿。就电力电子技术的理论研究而言，目前，德国、日本、美国、法国、荷兰等可以说是齐头并进。在这些国家，各种先进的电力电子功率变换装置不断开发和完善，促进电力电子技术向着更高技术水平迈进，实现用电设备的高效节能，为真正实现工控设备的小型化、轻量化、智能化奠定了重要的技术基础，也为 21 世纪电力电子技术的不断开拓创新描绘了广阔的前景。

我国研究开发电力电子器件的综合技术能力与国外发达国家相比，仍有较大的差距。要发展我国的电力电子技术并形成产业化规模，就必须走有中国特色的创新之路，即坚持产、学、研相结合的方针，从跟踪国外先进技术开始，逐步走上自主创新之路，同时，把技术创新与产品应用及市场推广有机结合，以加快科技创新的良性循环和自我强化，以使我国电力电子工业及器件制造技术得以长足的发展，并形成一个新的朝阳产业，转化为巨大的生产力，促进国民经济的高速度和可持续发展。

就 IGBT 技术本身而言，目前，国际上以西门子为领头羊，相关技术发展较

为成熟,技术更新周期也相对较短。而在国内,具有自主知识产权的 IGBT 研究和生产水平与美欧国家技术相比还有相当差距,产品缺少技术创新和竞争力,这是我国现代电力电子技术发展的主要技术瓶颈之一。

进入 20 世纪 90 年代以来,国内各行业技术的发展,对电力电子及工业自动化产品提出了日益紧迫的需求,预测国内市场年需求量以 10%~20% 的速度递增,估计整机年市场需求量超过数百亿元人民币。随着我国政府对各行业节能降耗、绿色环保的高度重视及民众呼声的高涨,国内各大工业体系必将进行大规模的技术改造,仅冶金行业在环境治理、节能降耗(改造工艺)、替代进口等技改项目估计就可达近千亿元人民币,其中,仅电力电子产品改造费用就达百亿元人民币以上。随着我国加入 WTO,各行各业为了降低产品综合成本,不断改进设备和工艺也是势在必行,因此,电力电子产品将长期持续发展以适应客观需求。

另外,国内每年约有百千亿的电机调速市场,其中,变频器需 IGBT 器件价值就超过数百亿元人民币。但截至目前,国内变频器 95% 靠进口。我国变频器发展不力主要是因为没有国产的 IGBT 器件与之配套,因而无法与国外产品竞争。而移动通信从 2G 到 3G CDMA 的改造中,对通信用开关电源的需求量也将增加 3 倍,另外,汽车电子、IT 行业和家用电器领域也蕴藏着一个巨大的市场需求。

从实际的发展情况看,近年来,国内成套装置的发展突飞猛进,UPS、开关电源、变频器、通信电源、家用电器、电机调速等这些国内市场兴旺、利润率高的产品开拓了我国 IGBT 的巨大应用市场,也使我国研制和开发具有自主知识产权的 IGBT 器件显得更加紧迫。

1.2.1 电机传动控制

交、直流传动装置的主要应用领域有:电动汽车及各种电动车辆,石油工业中钻井机械,轧钢工业中的各种热冷轧机、港口码头管理和装卸自动化,矿井机械,机床及各种生产线自动化,民宅控制、调速电梯、供水系统,纺织及造纸、印染化工等行业。

早期直流电机控制采用相控整流,20 世纪 90 年代后,用 IGBT 等高频大功率器件构成的 PWM 中、小功率直流调速装置,通过电机电感滤波作用获得直流电流,提高了系统效率、功率因数和动态响应。

用 MOSFET 和 IGBT 构成的 SPWM 变频调速装置,开关频率可达到 20kHz,消除了音频噪声,减小了谐波成分。由高功率因数($\cos\varphi=1$)三相 SPWM 整流器和逆变器组成的交流电机速度控制系统,允许能量双向流动,当整流器与逆变器的功能互换后,系统处于能量再生状态。

1.2.2 开关电源、UPS 和特种电源装置

计算机、通信工程、仪器仪表及各种微电子系统,要求电源重量轻、体积小、效率高。开关电源因具有上述优点应运而生,其需求量以每年 10% 的速度增长,当前开关电源主要采用 PWM 变换技术,利用 MOSFET、IGBT 进行高频逆变和高频整流实现 DC/DC 变换,移相式全桥 DC/DC 软开关变换及其他单端软开关变换等,使开关频率可达到 200~1000kHz,减小了无源元件的重量和体积,降低了电磁干扰(EMI)。UPS 的最新发展趋势是,采用 IGBT 高功率因数整流及 IGBT 软开关高频逆变技术,这种技术方案对于大功率 UPS 尤为重要。而感应加热、超声波发生器、特种电源等装置,则要求使用最佳频率实现高效变换和宽范围调节。

1.2.3 军事和空间技术

电力电子在军事上的应用主要是:雷达脉冲电源,声呐和声发射装置,飞机、坦克和舰船供电系统,水下武器推进系统,电子对抗,军用通信系统等,研究重点是提高波谱纯度、单位体积功率密度,减小设备的体积和重量,采用低压降器件,降低变换装置的导通和关断损耗,尤其要将可靠性设计放在首位。

1.2.4 环保省材工业技术

电力电子装置将成为节约能源的有力手段,从而改变我国能源利用率极低的现状。例如,在风机、泵类设备中应用变频调速装置和 IGBT 高压变频器,不仅可以调速节能,而且能满足特殊工艺要求。用 IGBT 电子逆变焊机取代变压器式弧焊电源,可使其体积减小到原来的五分之一至十分之一,焊接性能、效率和功率因数大大提高,并节省大量铜、铝等工业原料。汽车、家用电器及办公自动化领域的重大技术改造不仅为现代电力电子器件带来应用上的巨大商机,而且也是实现节能、环保的重要技术手段。

1.3 电力电子与民族工业的振兴

IGBT 作为现代电力电子领域的代表性器件,从诞生到现在仅 20 余年的时间,但其市场容量已经远远超过传统的整流器件,表现出极强的生命力和发展潜力。由于电力电子装置需向高频、大功率发展,因此,功率 MOSFET、IGBT 器件和智能功率模块将成为行业发展的重点。

1.3.1 建立完整的国家工业体系

IGBT 等电力电子器件及其应用技术是信息产业和传统产业之间的主要接

口, 是弱电控制强电的桥梁, 先进的电力电子技术可为我国传统产品及国防装备的技术改造提供良好的物质基础。

1.3.2 节能降耗符合国情

当前我国能源紧张, 供需之间存在着严重矛盾, 单产能耗是发达国家的 2~5 倍, 是印度的 1.65 倍。电力电子技术是节能降耗的基础技术, 我国计划从“一个基础”(即以 IGBT、功率 MOSFET 为代表的新型电力电子器件为基础)和“三个应用突破口”(即以电机调速、大功率开关电源和照明电子为突破口)来部署电力电子新技术和新产业的发展。近期产业化的重点是: 发展 IGBT、VDMOS 等新型电力电子器件, 形成芯片、模块小批量生产的能力; 开发中、大功率变频调速、电源谐波抑制及无功补偿等应用装置; 同时开展对 CoolMOS、SiC 等新型电力电子器件的研究工作, 开发并应用新一代电力电子产品, 加快发展电力电子技术, 从而实现节能降耗, 缓解我国能源长期紧缺的状况。

1.3.3 增强综合国力

IGBT 是发展高频电力电子技术的基础, 其制造技术是当今世界少数几种高、精、尖的前沿技术之一, 目前, 世界上也只有少数国家拥有并掌握该项技术。因此, 对 IGBT 的研究开发进而达到批量生产, 不仅可提升我国电力电子器件结构设计、制造工艺和成套装置的技术水平, 还可打破国外封锁及其产品一统天下的局面。因此, 开发具有自主知识产权的 IGBT 产品, 不仅有利于发展我国的工控装置, 也可以加强我国的国防装备水平, 满足战时对 IGBT 器件的急需, 对提升并增强我国综合国力具有重大的技术和经济意义。

1.4 本书的主要内容和章节安排

本书的主要内容分为三个部分: 基础理论、器件模型、器件设计和制造工艺。基础理论的内容在第 2、3 章中体现, 主要对 IGBT 的器件结构和工作原理作一系统介绍。器件模型在第 4~6 章中讨论, 是本书的重点, 涉及目前两种应用最为广泛的 IGBT 器件模型: 一种是准数值分析模型, 把 IGBT 的高阻厚外延层连同衬底与表面连接视为 PIN 二极管结构进行分析, 给出物理意义明确、简单易算的分析结果; 一种是等效电路模型, 提出了用电压控制电阻 (VCR) 等效 IGBT 高阻厚外延层的电导调制电阻的等效电路结构, 与现有 SPICE 等器件模拟软件兼容。本书建立的 IGBT 准数值分析和等效电路模型对 IGBT 的性能分析、设计优化和系统调试具有一定的指导作用和实用价值, 是实现电力电子系统自动化设计和调试的辅助工具。器件设计和工艺部分在第 7~9 章中介绍, 主要

讨论了目前广泛应用的平面工艺和极具发展潜力的 Trench 工艺。通过器件结构和工艺的优化设计,制作出符合设计要求且性能优良的 IGBT 器件。

全书共分九章,各章的主要内容如下:

第 1 章是绪论。

第 2 章回顾并总结了半导体功率器件从诞生到成熟的重大发展历程。

第 3 章重点介绍了 IGBT 基本结构和工作原理,以及 IGBT 重要电性能参数的设计、工艺控制和调整以及与器件结构和工艺参数的关系,讨论了 IGBT 和现有器件相比的优势和不足,使读者对 IGBT 的产生、发展和应用有一初步的了解。

第 4 章是 IGBT 模型研究的内容,建立了 PIN 结构的 IGBT 准数值分析模型,并应用于实际器件制作时的性能分析和优化,和传统数值分析模型相比,PIN 模型具有结构简单,物理意义明确的优点。

第 5 章重点研究了 IGBT 的等效电路模型,提出了一种新颖的 IGBT 等效电路结构,其中用电压控制电阻 (VCR) 计算 IGBT 高阻厚外延层的电导调制电阻取得了较好的结果,并建立了模型参数非破坏提取的系统理论,给出了简洁明了的模型参数提取和计算方法。用专业厂家的 IGBT 器件对模型作了直流特性方面的分析和验证。

第 6 章使用本书第 5 章开发的等效电路模型分析研究了 IGBT 的开关特性和温度效应,并与实际器件的测量结果进行了比较。对温度效应的分析和模拟表明,PT 和 NPT 结构 IGBT,都表现正、负温度系数特性,纠正了传统上认为 PT 器件具有正负温度系数而 NPT 器件只有正温度系数的不准确性。对开关特性的模拟,考虑了开启时电导调制的滞后性,关断时的电流拖尾延迟特性及非线性电容效应等。同时,本章内容也可看作是对本书所建 IGBT 等效电路模型验证的进一步深入。

第 7 章是平面工艺 IGBT 器件设计和工艺制造方面的内容,以 VLSI 先进制造技术为依托,以设计全自对准的 IGBT 版图和制作工艺流程为目标,并将本书设计用于器件制作实践中,获得有用的器件制作工艺参数控制数据和 IGBT 设计和工艺制作方面的经验。

第 8 章研究了发展潜力很大的 Trench-Gate IGBT 器件,基于 VLSI 先进的硅化物工艺,讨论了 Trench 工艺的优势,给出了作者设计的几种全自对准,2 掩模的 Trench-Gate IGBT 器件结构和制作工艺流程,其中的一项设计还获得国家授权发明专利,该专利技术减少了半导体器件制作的掩模数量,简化了工艺。

第 9 章论述了雪崩击穿的系统理论,及 pn 结平面终端技术,包括终端扩展及终端保护的技术和方法。

第 2 章 半导体功率器件技术回顾

2.1 引言

从物理的角度看,自从 1897 年 Thomson 证实电子的存在以来,人们只做了两件事:一是控制电子在真空中的运动状态,二是控制电子在固体中的运动状态,这些都是以电子的粒子性为基础的。可以认为,人类对电子运动状态的成功控制是当今高新技术开拓和应用的坚实基础。由于控制了电子在真空中的运动状态,促成 1906 年真空管的发明,于是无线电科学技术迅猛发展,从此人类进入了电子时代,人们认识自然、改造自然、创造现代生活的能力也大大提高。而后,科学家又对电子在固体中的运动规律作了深入研究,正是在此基础上,才有了 1947 年世界上第一只晶体管的发明,它使电子工业发生了革命性的变革。今天,半导体器件和集成电路已成为电子技术的主导,而电子技术是当代高新技术的重要支柱。

2.2 双极结型晶体管 (BJT) 技术

早在 1874 年 Braun 就发现了金属-半导体接触的整流特性^[1],他描述了金属-半导体接触的表面电阻与施加电压的极性 & 半导体表面状态 (surface condition) 的关系,并于 1904 年开始进行金属-半导体接触式整流器的各种应用试验^[2],虽然在当时人们对其物理机理尚所知甚少。期间,人们还发现和认识了半导体的其他基本性质,如光导电特性^[3~5]等,20 世纪 30 年代中期还制成了硒整流器和光探测器等。1931 年, Wilson 在固体能带理论的基础上建立了半导体的载流子输运理论^[6],图 2.1 给出了金属和 n 硅半导体接触前后的能带图,其中,图 2.1 (a) 是无表面态的理想情形,图 2.1 (b) 是存在表面态电荷的实际情形。1938 年, Schottky 发现无需化学催化作用,半导体自身的静态空间电荷就可以产生势垒^[7],后来人们称这一势垒为 Schottky 势垒。在同一年, Mott 也独立发表了金属-半导体接触的理论模型,并被称为 Mott 势垒^[8]。金属-半导体接触理论是所有半导体器件电极引出 (即欧姆接触和场效应器件栅极形成) 的基础理论, Henisch 对此作了全面详细的阐述^[9]。因为其在电流输运、微波应用等领域的重要性,同时还是分析半导体其他基本物理原理的重要工具,所以,人们对金属-半导体接触开展了深入广泛的研究工作,包括输运机理和制造工艺等方面的研究^[10~12]。

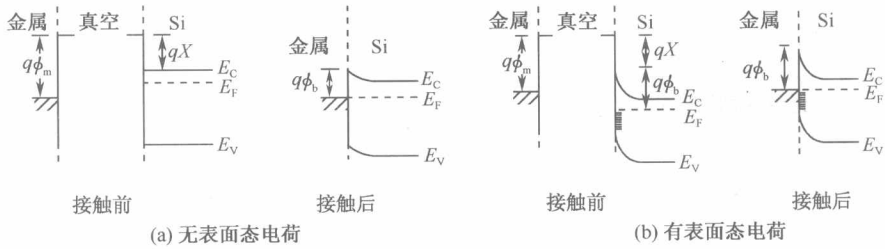


图 2.1 金属半导体接触能带图

第二次世界大战中断了当时正在进行的对半导体的许多基础研究工作，特别是贝尔实验室当时正在进行的试图发明一种用于开关电话信号的固态器件的研究工作。第二次世界大战结束后不久，所有的研究工作都很快陆续恢复起来。直到1947年，美国贝尔实验室的三位物理学家 Bardeen、Brattain 和 Shockley 进行点接触晶体管演示实验取得重大突破并紧接着向世人公布了其具有划时代历史意义的重要发明，即双极结型晶体管 (bipolar junction transistor, BJT)，简称双极晶体管或晶体管的发明^[13,14]，如图 2.2 所示。这项发明标志着对半导体的研究取得了空前的突破性进展，三位物理学家也因此于 1956 年同获诺贝尔物理学奖。

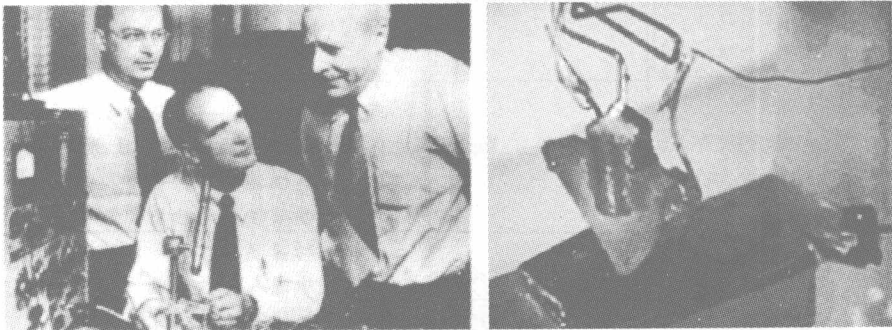


图 2.2 物理学家 Bardeen、Brattain、Shockley 和他们发明的晶体管

随后，Shockley 建立了 pn 结和晶体管 $I-V$ 特性的基础理论^[15,16]，并由 Sah、Noyce 和 Shockley^[17] 以及 Moll^[18] 对该理论作了进一步的完善。图 2.3 是双极晶体管的基本结构、符号和 $I-V$ 特性，图 2.4 是双极晶体管典型的制作工艺流程，图中各部分分别为：(1) 硅衬底，(2) 氧化，(3) 涂胶，(4) 光刻，(5) 显影，(6) 刻蚀氧化层，(7) 去胶，(8) 基区掺杂，(9) 氧化，(10) 光刻发射区，(11) 刻蚀，(12) 去胶，(13) 发射区掺杂，(14) 刻孔，(15) 刻正面金属，(16) 背面抛光与背面金属化。