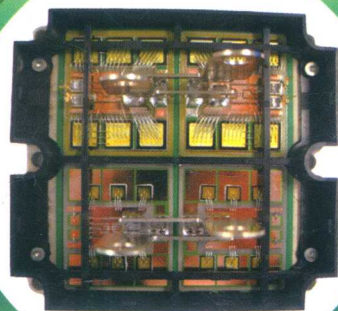


IEEE WILEY

新型电力电子器件丛书



碳化硅技术 基本原理

——生长、表征、器件和应用

Fundamentals of Silicon
Carbide Technology:
Growth, Characterization, Devices, and Applications

[日] 木本恒暢 (Tsunenobu Kimoto)

著

[美] 詹姆士 A. 库珀 (James A. Cooper)

夏经华 潘艳 杨霏 等译

- ▶ 一本有关碳化硅材料、器件工艺、器件和应用方面的书籍
- ▶ 全景般展示碳化硅领域的知识和进展，为碳化硅基功率器件进入实用化阶段提供借鉴
- ▶ 作者在碳化硅研发领域有着总共45年以上的经历，是当今碳化硅研发和功率半导体领域中的领军人物



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新型电力电子器件丛书

碳化硅技术基本原理

——生长、表征、器件和应用

Fundamentals of Silicon Carbide Technology:
Growth, Characterization, Devices, and Applications

[日] 木本恒暢 (Tsunenobu Kimoto)

[美] 詹姆斯 A. 库珀 (James A. Cooper)

夏经华 潘 艳 杨 霏 张安平

邓小川 温家良 邱宇峰

著

译



机械工业出版社

Copyright © 2014 John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices, and Applications*, ISBN: 978 - 1 - 118 - 31352 - 7, by Tsunenobu Kimoto and James A. Cooper, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2015 - 0862 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

碳化硅技术基本原理: 生长、表征、器件和应用 / (日) 木本恒暢, (美) 詹姆士 A. 库珀著; 夏经华等译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 1 (新型电力电子器件丛书)

书名原文: *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices, and Applications*

ISBN 978-7-111-58680-7

I. ①碳… II. ①木…②詹…③夏… III. ①碳化硅陶瓷 IV. ①TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 313919 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: 付承桂 责任编辑: 阎洪庆

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 马精明

责任印制: 孙 炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 32.25 印张 · 649 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 58680 - 7

定价: 150.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010 - 88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010 - 68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010 - 88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书是一本有关碳化硅材料、器件工艺、器件和应用方面的书籍，其主题包括碳化硅的物理特性、晶体和外延生长、电学和光学性能表征、扩展缺陷和点缺陷，器件工艺、功率整流器和开关器件的设计理念，单/双极型器件的物理和特征、击穿现象、高频和高温器件，以及碳化硅器件的系统应用，涵盖了基本概念和最新发展现状，并针对每个主题做深入的阐释，包括基本的物理特性、最新的理解、尚未解决的问题和未来的挑战。

本书作者在碳化硅研发领域有着总共 45 年以上的经历，是当今碳化硅研发和功率半导体领域中的领军人物。通过两位专家的执笔，全景般展示了碳化硅领域的知识和进展。目前，随着碳化硅基功率器件进入实用化阶段，本书的翻译出版对于大量已经进入和正在进入该行业，急需了解掌握该行业专业人士是一本难得的专业书籍。

本书可以作为从事碳化硅电力电子材料、功率器件及其应用方面专业技术人员的参考书，也可以作为高等学校微电子学与固体物理学专业高年级本科生、研究生的教学用书或参考书。同时，本书对于在诸如电力供应、换流器-逆变器设计、电动汽车、高温电子学、传感器和智能电网技术等方面的设计工程师、应用工程师和产品经理也是有益的。

译 者 序

半导体功率器件在经历从 20 世纪 70 年代以来的快速发展,已经成为当前世界上各种电力电子系统中的核心电子元件。半导体功率器件大量应用在从各类家用电器到以电力为主的各类工业设备、运输工具(包括新能源汽车、电力牵引等)和以高电压大功率半导体功率器件为主的现代高压、特高压交、直流和智能电网输电技术等。随着全球气候变暖的问题越来越受到人们关注,节能减排、提高能源效率的重要性日益突出,以柔性直流输电技术为主的智能电网技术由于可以大规模接纳风能和太阳能等清洁可再生能源,成为新一代绿色能源互联网技术的代表,其发展对其能源控制核心的功率半导体器件提出了更高的要求。碳化硅宽禁带半导体技术和基于碳化硅等功率半导体器件的发展,成为实现这一要求的理想选择之一。

作为第三代新型宽禁带半导体材料的代表,碳化硅具有出色的物理、化学和电性能特性。在功率半导体器件领域,特别是大功率、高电压和一些特殊环境中,例如高温、高辐射等环境中,碳化硅单晶材料具有举足轻重的地位和很好的应用前景,也是大功率、高电压功率半导体器件的发展方向。碳化硅技术在新一代绿色能源互联网上的应用可以显著提高输运电压等级,降低功耗,提高效率,减小所使用器件的数量和散热器体积,提高电网运行可靠性等。在经过 20 世纪 80~90 年代在碳化硅材料和器件制造工艺上的一系列突破,以及 2001 年世界上首枚碳化硅肖特基势垒二极管(SBD)和 2011 年的首枚碳化硅 MOSFET 成功实现商业化,碳化硅作为第三代宽禁带半导体材料在高压大功率半导体功率器件的重要地位和广阔前景得到世界的广泛确认。

本书是一本全景式介绍碳化硅及相关技术的专著,内容涵盖碳化硅材料、器件工艺、器件和应用等方面,涉及的主题包括碳化硅的物理特性、晶体和外延生长、电学和光学性能表征、扩展缺陷和点缺陷,器件工艺、功率整流器和开关器件的设计理念,单/双极型器件的物理和特征、击穿现象、高频和高温器件,以及碳化硅器件的系统应用,涵盖了基本概念和最新发展现状,并针对每个主题做深入的阐释,包括基本的物理特性、最新的理解、尚未解决的问题和未来的挑战。本书涉及面广、内容翔实、配有大量图表数据和精美图例,便于读者快速、全面了解碳化硅技术的原理、应用和发展。有鉴于目前国内碳化硅方面的书籍相对匮乏,特别是缺少一部代表目前碳化硅技术发展水平,并具有从材料到工艺,再到器件及应用这样一个大跨度的专业参考书籍,本书为国内相关从业科技人员和在校从事相关领域研究的教师及研究生不可多得的专业/教学书籍。本书的翻译也为那些不谙英语但想迅速掌握碳化硅相关技术的读者提供语言上的便利。

本书的作者 Tsunenobu Kimoto 是京都大学电子科学与工程系的一名教授，长期从事碳化硅材料、表征、器件工艺以及功率器件等方面的研究，是日本碳化硅界的领军人物，在碳化硅的外延生长、光学和电学特性表征、缺陷电子学、离子注入、金属-氧化物-半导体（MOS）物理和高电压器件等方面均有建树。而另一位作者，美国普渡大学电气与计算机工程学院的 James A. Cooper 则是一位半导体界的元老级人物，他在 MOS 器件、IC 及包括硅和碳化硅在内的功率器件方面都有研究和建树，特别是碳化硅基 UMOSFET、肖特基二极管、UMOSFET、横向 DMOSFET、BJT 和 IGBT 等的开发做出了突出贡献。

为了使本书尽快与读者见面，全球能源互联网研究院有限公司、西安交通大学和电子科技大学的相关科技人员参与了本书的翻译工作。具体分工如下：邱宇峰负责第 1 章的翻译工作，温家良负责第 11 章的翻译工作，电子科技大学的邓小川负责第 7、9 章的翻译工作，西安交通大学的张安平负责第 4、5 章的翻译工作，杨霏负责第 6、8 章的翻译工作，潘艳负责第 2、10 章的翻译工作，夏经华负责第 3、12 章及附录的翻译工作。全书的校审工作由夏经华负责完成。另外，以下同志也参与了本书的部分工作，译者对他们为本书的努力和付出表示衷心感谢，他们是，朱榭晖、郑柳、王方方、李玲、王嘉铭、王德辉、王秋雨、王愈轩、孙俊达、涂浩、崔磊、徐哲、田丽欣、田哲元。

从本书的策划、翻译到最后完稿付梓，机械工业出版社给予了大力支持和帮助，特别感谢付承桂编辑在对本书的出版工作中所做的大量工作和贡献。

由于本书所涉及的专业面很宽，本书作者又是该领域的著名专家，虽经译者反复努力，但囿于译者有限的水平和时间，疏漏之处在所难免，望读者不吝指正。

译者

全球能源互联网研究院有限公司

原书前言

作为各类电力电子系统中的关键部件，功率半导体器件受到越来越多的关注。功率器件的主要应用包括电源、电机控制、可再生能源、交通、通信、供热、机器人技术及电力传输和分配等方面。半导体功率器件在这些系统中的应用可以显著节省能源，加强化石燃料的节约，并减少环境污染。

随着一些新兴市场的出现，包括光伏电池和燃料电池的电能变换器、电动汽车 (EV) 和混合动力电动汽车 (HEV) 用电能变换器和逆变器，以及智能电力设备配电网的控制，电力电子在过去的十年里再次引发全新的关注。目前，半导体功率器件是未来全球节能和电能管理的关键推动力之一。

在过去的几十年里，硅功率器件得到了显著的提升。然而，这些器件正在接近由硅的基本材料特性所限定的性能极限，进一步性能的提升只有通过迁移到更强大的半导体材料。碳化硅 (SiC) 是一种有着优异物理和电气性能的宽禁带半导体，适合作为未来的高电压、低损耗电力电子的基础。

SiC 是一种 IV-IV 族化合物半导体，有着 2.3 ~ 3.3 eV 的禁带宽度 (取决于晶体结构，或多型体)，它拥有 10 倍于 Si 的击穿电场强度、3 倍于 Si 的热导率，使得 SiC 对于大功率和高温器件具有特别的吸引力。例如，在给定阻断电压下，SiC 功率器件的通态电阻比 Si 器件的要低好几个数量级，这会大大提高电能变换效率。SiC 的宽禁带特性和高热稳定性使得某些类型的 SiC 器件可以在结温达 300°C 或者更高的温度下无限期工作而不会产生可测量的性能退化。在宽禁带半导体中，SiC 是比较特殊的，因为它可以容易地在超过 5 个数量级的范围进行 p 型或者 n 型掺杂；另外，SiC 是唯一的化合物半导体，其自然氧化物是 SiO₂，是和硅的自然氧化物一样的绝缘体，这使得用 SiC 制造整个基于 MOS (金属-氧化物-半导体) 家族的电子器件成为可能。

自 20 世纪 80 年代以来，有关 SiC 材料和器件技术的开发得到了持续的投入。基于 20 世纪 80 年代和 90 年代的多项技术突破，SiC 肖特基势垒二极管 (SBD) 的商业化产品于 2001 年成功面世，并且在过去的若干年里，SiC SBD 的市场得到了迅速发展。SBD 被应用于各种类型的电力系统中，包括开关电源、光伏变换器及空调、电梯和地铁的电机控制。SiC 功率开关器件的商业化生产开始于 2006 ~ 2010 年间，主要有 JFET (结型场效应晶体管) 和 MOSFET (金属-氧化物-半导体场效应晶体管)。这些器件得到了市场广泛接受，现在，很多行业已经开始利用这些 SiC 功率开关器件所带来的好处。作为一个例子，根据 SiC 元器件应用的程度，一个电源或逆变器的体积和重量可以减少 4 ~ 10 倍。除了尺寸和重量方面的减少外，

使用 SiC 元器件还可以使功耗也得到了大幅降低，从而使电力变换系统的效率得到显著提高。

近年来，SiC 专业社团在学术界和工业界发展迅猛，越来越多的公司在致力于发展 SiC 晶圆和/或器件的生产制造能力，相关的年轻科学家和工程师的数量也在与日俱增。然而，现在几乎没有教科书在从材料到器件再到应用这样宽的范围内涵盖 SiC 技术，因此，这些科学家、工程师和研究生会是本书的潜在读者。作者也希望本书对这些读者来说是及时的和有益的，并使得他们可以迅速获得在此领域内实践所需的基本知识。由于本书同时包涵了基础和高级概念，需要读者有一定的半导体物理及器件基础，不过，对于材料科学或者电气工程专业的研究生来说，阅读本书将不会有困难。

本书所涉及的主要内容包括 SiC 的物理特性、晶体和外延生长、电学和光学性能表征、扩展缺陷和点缺陷、器件工艺、功率整流器和开关器件的设计理念、单/双极型器件的物理和特征、击穿现象、高频和高温器件以及 SiC 器件的系统应用，涵盖了基本概念和最新发展现状。特别是，我们力图对每个主题做深入的阐释，包括基本的物理特性、最新的理解、尚未解决的问题和未来的挑战。

最后，本书作者致谢这一领域的一些同事和先驱，特别感谢 W. J. Choyke 教授（匹兹堡大学）、H. Matsunami 荣誉教授（京都大学）、G. Pensl 博士（埃尔兰根 - 纽伦堡大学，已故）、E. Janzén 教授（林雪平大学）和 J. W. Palmour 博士（科锐公司），感谢他们对本领域和我们对本领域的认识的宝贵贡献；我们也对 Wiley 出版社的 James Murphy 先生和 Clarissa Lim 女士的指导和耐心表示感谢。最后，我们要感谢我们的家人在写作本书时给予的体贴支持和鼓励，没有他们的支持和理解，就不会有本书的出版。

木本恒暢
詹姆士 A. 库珀

原书作者简介

木本恒暢 (Tsunenobu Kimoto) 分别于1986年和1988年于日本京都大学获得工学学士学位和工学硕士学位。毕业后于同年，他加入住友电气工业株式会社（住友電気工業株式会社）工作，在那里，他对非晶硅太阳能电池和半导体金刚石材料进行了研究与开发。自1990年，他作为京都大学（Kyoto University）的一名研究助理开始了他的学术生涯，并于1996年凭借对碳化硅（SiC）生长和器件制造方面的研究工作获得京都大学博士学位。在1996~1997年期间，他作为一名访问科学家在瑞典林雪平大学（Linköping University）工作。现在，他是京都大学电子科学与工程系的一名教授。

他的主要科研活动包括SiC的外延生长、光学和电学特性表征、缺陷电子学、离子注入、金属-氧化物-半导体（MOS）物理和高电压器件。此外，他也参与了在纳米级的硅、锗器件、用于非易失存储器的新型材料，以及基于氮化镓（GaN）的电子器件方面的研究。他是美国电气电子工程师学会（IEEE）、美国材料研究学会（MRS）、日本应用物理学会（JSAP）、日本电子情报通信学会（IEICE）和英国电气工程师学会（IEE）的会员。

詹姆士 A. 库珀 (James A. Cooper) 于1968年和1969年分别于密西西比州立大学（Mississippi State University）和斯坦福大学（Stanford University）获得电气工程学士学位和硕士学位。在1968~1970年期间，他是桑迪亚国家实验室（Sandia National Laboratory）的一名职员。在1970~1973年期间，他进入普渡大学（Purdue University）学习，在那里，他因为在MOS电导技术理论的推广方面的工作而获得博士学位。他于1973年加入贝尔实验室（Bell Laboratory, Murray Hill），在贝尔实验室，他设计的互补金属-氧化物-半导体（CMOS）集成电路，其中就包括美国电话电报公司（AT&T）的第一个微处理器，并且他主导了对硅反型层中的高场强输运方面的研究工作。他于1983年加入普渡大学任教，现在是该校电气与计算机工程学院教授。

在1983~1990年期间，他研究了砷化镓（GaAs）动态存储器，并于1990年起开始致力于SiC的研究。他的团队展示了首个SiC双注入金属-氧化物-半导体场效应晶体管（DMOSFET）和首个SiC数字集成电路，并对肖特基二极管、U型MOSFET（UMOSFET）、横向DMOSFET、双极结型晶体管（BJT）和绝缘栅双极晶体管（IGBT）的开发做出了贡献。他们也多种其他类型的SiC器件进行了研究，包括晶闸管、电荷耦合器件（CCD）、金属-半导体场效应晶体管（MESFET）、静电感应晶体管（SIT）和碰撞电离雪崩渡越时间（IMPATT）二极管。

库珀教授是IEEE的终身会士，同时也是普渡大学电气与计算机工程学院 William Harrison 和 Jai N. Gupta 教授职位，并且是普渡大学的 Birck 纳米技术中心创始主任。

目 录

译者序

原书前言

原书作者简介

第1章 导论	1
1.1 电子学的进展	1
1.2 碳化硅的特性和简史	3
1.2.1 早期历史	3
1.2.2 SiC 晶体生长的革新	4
1.2.3 SiC 功率器件的前景和展示	5
1.3 本书提纲	6
参考文献	7
第2章 碳化硅的物理性质	10
2.1 晶体结构	10
2.2 电学和光学性质	14
2.2.1 能带结构	14
2.2.2 光吸收系数和折射率	17
2.2.3 杂质掺杂和载流子浓度	19
2.2.4 迁移率	22
2.2.5 漂移速率	25
2.2.6 击穿电场强度	26
2.3 热学和机械特性	29
2.3.1 热导率	29
2.3.2 声子	29
2.3.3 硬度和机械性能	30
2.4 总结	30
参考文献	31
第3章 碳化硅晶体生长	36
3.1 升华法生长	36
3.1.1 Si—C 相图	36
3.1.2 升华（物理气相输运）法过程中的基本现象	36
3.1.3 建模与仿真	40
3.2 升华法生长中多型体控制	43

3.3 升华法生长中缺陷的演化及减少	46
3.3.1 堆垛层错	46
3.3.2 微管缺陷	47
3.3.3 贯穿螺型位错	49
3.3.4 贯穿刃型位错及基矢面位错	50
3.3.5 减少缺陷	53
3.4 升华法生长中的掺杂控制	54
3.4.1 杂质掺杂	54
3.4.2 n型掺杂	56
3.4.3 p型掺杂	57
3.4.4 半绝缘型	57
3.5 高温化学气相沉积	59
3.6 溶液法生长	61
3.7 化学气相淀积法生长 3C-SiC 晶圆	62
3.8 切片及抛光	63
3.9 总结	64
参考文献	65
第4章 碳化硅外延生长	70
4.1 SiC 同质外延的基本原理	70
4.1.1 SiC 外延的多型体复制	70
4.1.2 SiC 同质外延的理论模型	73
4.1.3 生长速率及建模	78
4.1.4 表面形貌及台阶动力学	81
4.1.5 SiC 外延的反应室设计	83
4.2 SiC CVD 生长中的掺杂控制	85
4.2.1 背景掺杂	85
4.2.2 n型掺杂	86
4.2.3 p型掺杂	86
4.3 SiC 外延层中的缺陷	87
4.3.1 扩展缺陷	87
4.3.2 深能级缺陷	95
4.4 SiC 快速同质外延	97
4.5 SiC 在非标准平面上的同质外延	99
4.5.1 SiC 在近正轴 {0001} 面上的同质外延	99
4.5.2 SiC 在非基矢面上的同质外延	101
4.5.3 SiC 嵌入式同质外延	102
4.6 其他 SiC 同质外延技术	103
4.7 3C-SiC 异质外延	104
4.7.1 3C-SiC 在 Si 上的异质外延生长	104
4.7.2 3C-SiC 在六方 SiC 上的异质外延生长	105

4.8 总结	106
参考文献	107
第5章 碳化硅的缺陷及表征技术	117
5.1 表征技术	117
5.1.1 光致发光	117
5.1.2 拉曼散射	125
5.1.3 霍尔效应及电容-电压测试	127
5.1.4 载流子寿命测量	128
5.1.5 扩展缺陷的检测	133
5.1.6 点缺陷的检测	140
5.2 SiC 的扩展缺陷	145
5.2.1 SiC 主要的扩展缺陷	145
5.2.2 双极退化	145
5.2.3 扩展缺陷对 SiC 器件性能的影响	150
5.3 SiC 中的点缺陷	154
5.3.1 SiC 中的主要深能级缺陷	154
5.3.2 载流子寿命“杀手”	162
5.4 总结	167
参考文献	168
第6章 碳化硅器件工艺	176
6.1 离子注入	176
6.1.1 选择性掺杂技术	177
6.1.2 n 型区的离子注入	178
6.1.3 p 型区的离子注入	182
6.1.4 半绝缘区域的离子注入	186
6.1.5 高温退火和表面粗糙化	187
6.1.6 离子注入及后续退火过程中的缺陷形成	189
6.2 刻蚀	194
6.2.1 反应性离子刻蚀	194
6.2.2 高温气体刻蚀	197
6.2.3 湿法腐蚀	198
6.3 氧化及氧化硅/SiC 界面特性	199
6.3.1 氧化速率	199
6.3.2 氧化硅的介电性能	200
6.3.3 热氧化氧化硅的结构和物理特性	204
6.3.4 电学表征技术及其局限性	206
6.3.5 氧化硅/SiC 界面特性及其改进方法	220
6.3.6 不同晶面上的氧化硅/SiC 界面特性	227
6.3.7 迁移率限制因素	229

6.4 金属化	234
6.4.1 n型和p型SiC的肖特基接触	235
6.4.2 n型和p型SiC的欧姆接触	241
6.5 总结	247
参考文献	248
第7章 单极型和双极型功率二极管	262
7.1 SiC功率开关器件简介	262
7.1.1 阻断电压	262
7.1.2 单极型功率器件优值系数	264
7.1.3 双极型功率器件优值系数	265
7.2 肖特基势垒二极管(SBD)	267
7.3 pn与pin结型二极管	271
7.3.1 大注入与双极扩散方程	273
7.3.2 “i”区中的载流子浓度	274
7.3.3 “i”区的电势下降	276
7.3.4 电流-电压关系	278
7.4 结势垒肖特基(JBS)二极管与混合pin肖特基(MPS)二极管	280
参考文献	284
第8章 单极型功率开关器件	286
8.1 结型场效应晶体管(JFET)	286
8.1.1 夹断电压	287
8.1.2 电流-电压关系	287
8.1.3 饱和漏极电压	289
8.1.4 比通态电阻	290
8.1.5 增强型和耗尽型工作模式	293
8.1.6 功率JFET器件的实现	296
8.2 金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)	297
8.2.1 MOS静电学回顾	297
8.2.2 分裂准费米能级的MOS静电学	300
8.2.3 MOSFET电流-电压关系	301
8.2.4 饱和漏极电压	303
8.2.5 比通态电阻	304
8.2.6 功率MOSFET的实施:DMOSFET和UMOSFET	304
8.2.7 DMOSFET的先进设计	307
8.2.8 UMOS的先进设计	309
8.2.9 阈值电压控制	311
8.2.10 反型层电子迁移率	314
8.2.11 氧化层可靠性	325
8.2.12 MOSFET瞬态响应	327

参考文献	334
第9章 双极型功率开关器件	336
9.1 双极结型晶体管 (BJT)	336
9.1.1 内部电流	337
9.1.2 增益参数	338
9.1.3 端电流	340
9.1.4 电流 - 电压关系	341
9.1.5 集电区中的大电流效应: 饱和和准饱和	343
9.1.6 基区中的大电流效应: Rittner 效应	347
9.1.7 集电区的大电流效应: 二次击穿和基区扩散效应	351
9.1.8 共发射极电流增益: 温度特性	353
9.1.9 共发射极电流增益: 复合效应	353
9.1.10 阻断电压	355
9.2 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	356
9.2.1 电流 - 电压关系	357
9.2.2 阻断电压	367
9.2.3 开关特性	368
9.2.4 器件参数的温度特性	373
9.3 晶闸管	375
9.3.1 正向导通模式	377
9.3.2 正向阻断模式和触发	381
9.3.3 开通过程	386
9.3.4 dV/dt 触发	388
9.3.5 dI/dt 的限制	389
9.3.6 关断过程	390
9.3.7 反向阻断模式	397
参考文献	397
第10章 功率器件的优化和比较	398
10.1 SiC 功率器件的阻断电压和边缘终端	398
10.1.1 碰撞电离和雪崩击穿	398
10.1.2 二维电场集中和结的曲率	404
10.1.3 沟槽边缘终端	406
10.1.4 斜面边缘终端	406
10.1.5 结终端扩展 (JTE)	408
10.1.6 浮空场环 (FFR) 终端	409
10.1.7 多浮空区 (MFZ) JTE 和空间调制 (SM) JTE	412
10.2 单极型器件漂移区的优化设计	415
10.2.1 垂直漂移区	415

10.2.2 横向漂移区	418
10.3 器件性能比较	420
参考文献	424
第 11 章 碳化硅器件在电力系统中的应用	425
11.1 电力电子系统的介绍	425
11.2 基本的功率变换电路	426
11.2.1 工频相控整流器和逆变器	426
11.2.2 开关模式直流 - 直流变换器	429
11.2.3 开关模式逆变器	433
11.3 电动机驱动的电力电子学	438
11.3.1 电动机和电动机驱动的简介	438
11.3.2 直流电动机驱动	438
11.3.3 感应电动机驱动	441
11.3.4 同步电动机驱动	445
11.3.5 混合动力和纯电动汽车的电动机驱动	447
11.4 电力电子学与可再生能源	450
11.4.1 光伏电源逆变器	450
11.4.2 风力机电源的变换器	451
11.5 开关模式电源的电力电子学	453
11.6 碳化硅和硅功率器件的性能比较	458
参考文献	464
第 12 章 专用碳化硅器件及应用	466
12.1 微波器件	466
12.1.1 金属 - 半导体场效应晶体管 (MESFET)	466
12.1.2 静态感应晶体管 (SIT)	469
12.1.3 碰撞电离雪崩渡越时间 (IMPATT) 二极管	474
12.2 高温集成电路	475
12.3 传感器	477
12.3.1 微机电传感器	478
12.3.2 气体探测器	479
12.3.3 光探测器	481
参考文献	487
附录	490
附录 A 4H - SiC 中的不完全杂质电离	490
参考文献	494
附录 B 双曲函数的性质	494
附录 C 常见 SiC 多型体主要物理性质	497
C.1 性质	497
C.2 主要物理性质的温度和/或掺杂特性	498
参考文献	499

第 1 章 导 论

1.1 电子学的进展

在现代社会中，半导体材料与器件的发展已经成为推动各种革命性变革和创新的一支强大驱动力。自从 1947 ~ 1948 年基于锗 (Ge) 的双极型晶体管的发明^[1,2]和接下来硅 (Si) 基金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管 (MOSFET) 的成功^[3]，半导体器件已经诞生出一个新领域：固态电子学。而基于平面工艺技术制造的集成电路 (IC) 的发明^[4,5]则激发了微电子学的快速发展。当今，Si 基大规模集成电路 (LSI) 是几乎所有电气和电子系统中的关键部件。尽管存在对其物理极限的预期，但是即便是在今天，Si 基 LSI 仍然继续在迅猛发展^[6,7]，太阳能电池和各种传感器也主要是用硅制造的。

在同一时期里，化合物半导体在一些特殊的应用中建立起其独特的地位，而在这些应用中 Si 基器件由于本征材料特性使得其难以表现出良好的性能。特别是 III - V 族半导体，例如砷化镓 (GaAs) 和磷化铟 (InP)，已经广泛应用于高频器件和发光器件^[8,9]。除了多数 III - V 族半导体具有的高电子迁移率和直接能带结构外，带隙工程和异质结构的形成可以用来提高基于化合物半导体器件的性能。基于氮化镓 (GaN) 和氮化铟镓 (InGaN) 的蓝光和绿光发光器件的成功研制也在半导体历史中具有里程碑意义^[10,11]。因此，光电子学是最重要的发展领域之一，并且依赖于这些 III - V 族半导体。

随着我们社会在科技上的不断进步，对半导体器件的新功能提出了各种要求，例如高温工作和柔性的要求。高温电子学是一个对于宽禁带半导体而言具有很大前景的领域^[12]，而有机半导体和氧化物半导体则已经用于发展柔性电子学^[13]。

提高能量效率（减少能量消耗和损耗）是我们目前所面对的最基本问题之一。2010 年，世界上电能消耗占总能量消耗的平均比率达 20%^[14]，并且预计这个比率在未来会迅速增加。不管电能是如何产生的，将电能经济而有效地传递到负载的过程中需要用到电能的调节和变换。据估计，超过 50% 的电流经某种形式的电能变换。

电力电子学的概念是由 Newell 在 1973 年引入的^[15]，它涉及利用功率半导体器件和电路进行电能变换。通过调节和变换电能使电能可以以最佳形式供给负载。电能变换包括交流 - 直流 (AC - DC)、直流 - 交流 (DC - AC)、直流 - 直流 (DC - DC) (电压变换)、交流 - 交流 (AC - AC) (电压或频率变换)^[16]。基于现有的技术，典型的电能变换效率只有 85% ~ 95%，这并不足够高，因为在每次电

能变换中，有约 10% 的电能以热能的形式损耗了。在很常见的 AC - DC 和 DC - AC 变换中，变换的效率低至大约 $(0.9)^2 \approx 0.8$ 。

一般来说，电力电子的效率受限于半导体器件、电容、电感以及封装的性能，特别是，作为限制电能变换器性能和尺寸的关键部件，功率半导体器件受到越来越多的关注。如图 1-1 所示，功率器件的主要应用包括电源、电机控制、通信、供热、机器人技术、电动/混合动力汽车、牵引、照明镇流器和电力传输。开发高电压和低损耗的功率器件也是构建未来智能电网的基础。

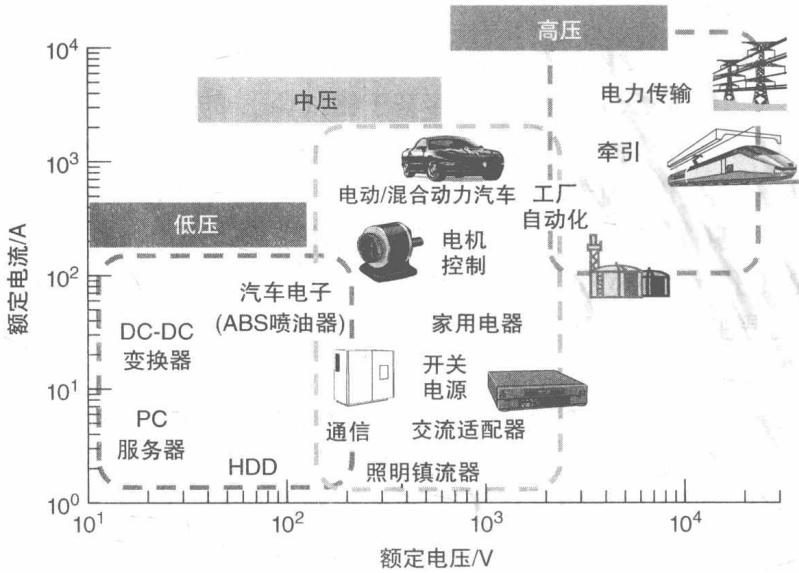


图 1-1 功率器件主要应用领域的额定电压分布图

高性能功率器件的实现将不仅会节约大量能量，还可以节约化石燃料，减少环境污染。目前，Si 是最常用的功率器件用半导体材料，在经过了功率 MOSFET 和 IGBT (绝缘栅双极型晶体管) 的开发^[17,18]，Si 功率开关器件的性能得到了显著提升，Si 基 LSI 技术和先进的仿真技术在近几十年来的发展对 Si 功率器件产生了巨大的影响。然而，目前 Si 功率器件技术已经相对成熟，基于该技术已经不容易实现创新性突破。碳化硅 (SiC) 是一个古老而又新兴的半导体材料，由于其具有的优异物理性能，它在先进功率器件中具有巨大潜力。同样，SiC 器件也在高温和抗辐照作业方面具有很好的前景。氮化镓 (GaN) 也是一个很具吸引力的功率器件材料，其本征的潜力非常接近于 SiC 的 (因为它们有着几乎相同的禁带宽度和临界电场强度)。然而目前，SiC 的生长和器件制造技术更先进，SiC 功率器件也有着更好的性能和可靠性表现。基于在 Si 上异质外延生长的 GaN 上制造的 GaN 基横向开关器件在较低电压 (100 ~ 300V) 应用上展现出一些令人满意的前景。当 GaN 技术发展渐趋成熟时，特别是当实现大尺寸衬底生长时，SiC 和 GaN 功率器件将会根据其性能和成本得以广泛应用。然而，由于 SiC 具有的间接能带结构，使得其本征地拥有长载流子寿命，因而 SiC 在高压双极型器件应用上具有天然优势。