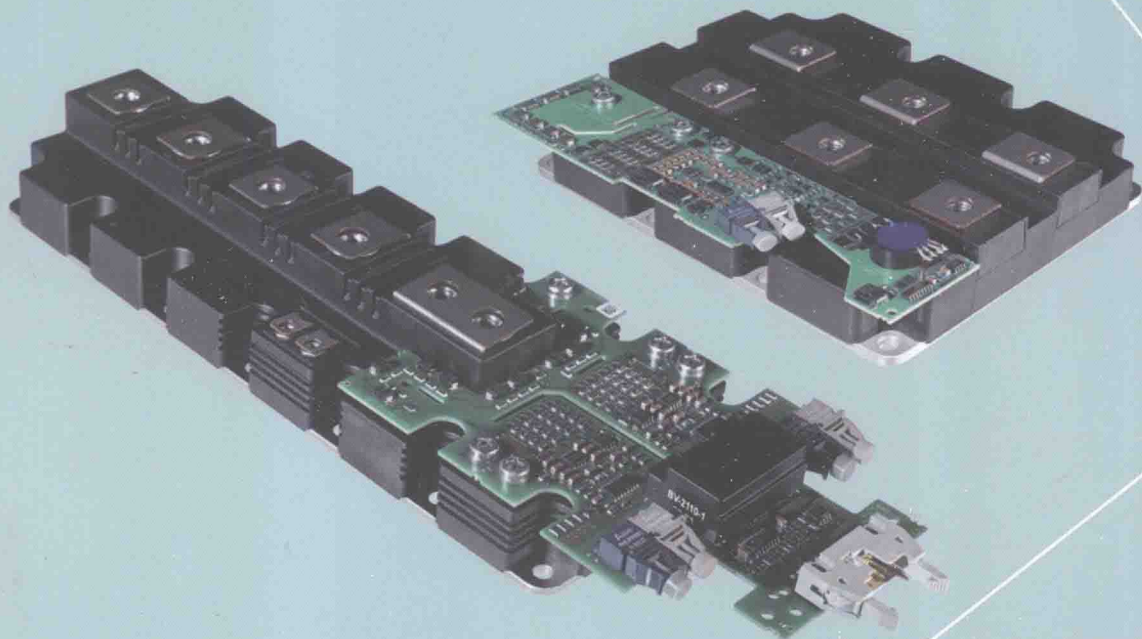




中文版·原书第2版

IGBT模块：技术、驱动和应用

IGBT Modules Technologies, Driver and Application

[德] 安德烈亚斯·福尔克(Andreas Volke) 著
迈克尔·郝康普(Michael Hornkamp)
韩金刚 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS




英飞凌
www.infineon.com

IGBT 模块：技术、驱动和应用

IGBT Modules Technologies, Driver and Application

(中文版·原书第2版)

[德] 安德烈亚斯·福尔克 (Andreas Volke) 著
麦克尔·郝康普 (Michael Hornkamp)
韩金刚 译



机械工业出版社

IGBT Modules

Technologies, Driver and Application

Andreas Volke, Michael Hornkamp

ISBN: 978-3-00-040134-3

Copyright © 2012 by Infineon Technologies AG

Original edition published by Infineon Technologies AG. All Rights reserved. 本书原版由 Infineon Technologies AG 出版。版权所有，盗印必究。

This title is published in China by China Machine Press with license from Infineon Technologies AG. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Infineon Technologies AG 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2014-2538 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

IGBT 模块：技术、驱动和应用：原书第 2 版/（德）福尔克（Volke, A.），（德）郝康普（Hornkamp, M.）著；韩金刚译.—北京：机械工业出版社，2016.5

书名原文：IGBT Modules

Technologies, Driver and Application

ISBN 978-7-111-53566-9

I. ① I … II. ① 福… ② 郝… ③ 韩… III. ① 绝缘栅场效应晶体管—研究 IV. ① TN386.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 080325 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：于苏华 责任编辑：于苏华 路乙达

责任校对：张 征 封面设计：马精明

责任印制：乔 宇

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·25.25 印张·626 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-53566-9

定价：88.00 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

本书是关于 IGBT 应用技术的专著，由两位长期在英飞凌从事 IGBT 应用技术推广的工程师撰写，概念论述清楚，并以双脉冲为基础实验方法，讲述 IGBT 的动态特性、IGBT 驱动技术和功率单元的设计和验证方法。本书应用实例丰富，是体现当今的 IGBT、IGBT 驱动及其应用技术的参考书。

全书论述了 IGBT 和 IGBT 模块的基本原理、电气和物理特性及应用技术，包括以下内容：

1. 介绍了 IGBT 芯片的半导体结构和工作原理，并用以分析芯片的电气特性，以提高学生和工程师在应用 IGBT 中分析问题、解决问题的能力。
2. 深入探讨了 IGBT 的封装工艺技术、模块的寄生参数、热管理设计和可靠性问题。
3. 介绍了 IGBT 和续流二极管的参数定义、测试方法和对数据手册的理解。
4. 介绍了 IGBT 驱动技术和保护。
5. 介绍了 IGBT 在实际系统中的动态特性、串并联技术等。
6. 介绍了应用的基本电路结构和逆变器设计基础。

全书包括大量 IGBT 的实际开关特性、应用实例以及设计规则。同时还涵盖了电力电子应用中涉及的工程测量技术和信号电子学。最后从电力电子装置的质量和可靠性方面探讨了对 IGBT 和 IGBT 模块的要求。

本书的读者对象包括：大专院校电力电子及相关专业的教师、研究生，科研机构的研发人员、应用领域的工程技术人员及其他相关人员。本书自成体系，适合高等教育相关专业用作教材或专业参考书，亦可作为电力电子学界和研发、生产企业工程技术人员的参考书。本书由部分高校推荐，机械工业出版社组织翻译出版。

感谢英飞凌中国有限公司的应用工程师团队在翻译过程中的技术支持。

译者序

自从20世纪80年代发明绝缘栅双极型晶体管(IGBT)以来,IGBT技术发展迅速,其作为电能变换的核心器件,涵盖了从几十瓦到几十兆瓦的电力电子应用。目前IGBT已经广泛地应用于消费类电器、工业控制、新能源发电、智能电网、机车牵引和电动汽车的交通运输领域,成为变流装置的主要开关器件。中国作为能源生产和消费大国,IGBT大量用于功率变换中,以实现新能源产生、传输和高能效的利用。为此,中国制定了IGBT的相关国家标准,开始推进IGBT的研究和产业发展,但目前国内系统论述IGBT的专著和教材很少。

本书的英文原版是关于IGBT应用技术的专著,由两位长期在英飞凌从事IGBT应用技术推广的工程师编写,基本概念论述清楚,并以双脉冲为基础实验方法,讲述IGBT的动态特性、IGBT驱动技术和功率单元的设计和验证方法,应用实例丰富,是体现当今IGBT、IGBT驱动及其应用技术的参考书。

两位作者Andreas Volke和Michael Hornkamp都毕业于德国SOEST应用科技大学的电气工程技术系,长期从事功率半导体应用技术的研发工作。Andreas Volke和Michael Hornkamp分别于2003年和2000年加入英飞凌科技,并参与了IGBT模块和IGBT驱动的研发。本书既是作者长期工作经验和成果的积累,也是英飞凌科技有限公司在功率半导体领域技术的凝练,是一部集理论、技术、产品、应用实践为一体的优秀著作。

英飞凌公司作为国际最主要的IGBT生产厂商之一,长期致力于IGBT和IGBT模块的研发、制造和应用技术的开发,始终引领全球的IGBT的技术标准的发展,也非常注重应用技术推广和学生的培养。英飞凌在中国每年举办和参加技术论坛,为国内从业人员和企业提供技术培训和他支持,还通过英飞凌中国大学计划将先进的技术和理念传播到国内高校,每年举办英飞凌学者论坛进行学术交流,促进了中国IGBT技术的发展和应川。

德国科学院院士Leo Lorenz教授退休前为英飞凌有限公司的高级总工程师,退休后仍然奔波于世界各地,讲授和推广IGBT技术。每年他都到中国访问数次,在多个高校讲学,也是在上海举办的PCIM Asia国际会议的主席。

上海海事大学电力传动与控制研究所通过国家“高端人才项目”聘请Leo Lorenz博士来华执教,并与中国电源学会联合举办“国际电力电子器件与应用高端课程”,旨在推进IGBT技术的研究和发展。上海海事大学电力传动与控制研究所与英飞凌科技也保持着良好的合作关系,英飞凌也每年参与高端课程的授课并提供实验装置。

本书的主要特色在于系统地阐述IGBT原理、特性和应用之间的关系,从而帮助学生全面地认识功率半导体器件及其应用,并有助于电力电子研发工程师掌握IGBT模块的选型、设计和应用。经多位高校老师的推荐,机械工业出版社引进本书并获得中文版翻译权和专有出版权,上海海事大学汤天浩教授推荐译者主持翻译工作。

本书从翻译到最后出版得到了英飞凌科技(中国)有限公司工程师团队以及汤天浩教授的极大鼓励和帮助,译者对他们表示由衷的感谢!同时,译者所在课题组的研究生杨腾飞、杨义、胡惠雄、吴鹏、陈铭、万一彬等分担了大量的文字录入和校对工作,在此,



译者对他们一并表示感谢。

希望本书的翻译出版能为国内读者学习和掌握 IGBT 的先进技术提供帮助，让从业人员能更好地应用 IGBT 研制出技术领先的变流装置和电源，进而促进中国电源技术的提升和发展。

由于译者水平及经验有限，本书可能存在不当与疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

译者

2016 年 3 月

序

随着 MOS 控制功率半导体器件的出现和发展，电力电子技术实现了高功率密度和高效率的突破，同时也使系统的可靠性进一步提高，并给出了更经济的技术解决方案。在几十瓦到几兆瓦的功率范围内，IGBT 一直是关键技术，其卓越的性能意味着 IGBT 不仅可以取代现有系统中传统的完全可控功率半导体器件，而且开启了全新的应用领域。然而，对器件技术的理解程度，对应用和工作需求的认识，设计和测试驱动电路及保护功能，是系统能够在全功率范围内安全、可靠运行的重要因素。与此同时，也要兼顾优化系统成本。

目前，针对电力电子变换器、开关拓扑和系统已经发表和出版了大量高质量的论文和书籍，而一些综合性的作品则从理论和设计实现技术方面分别阐述了主要新型功率半导体元件的半导体物理学原理和元胞结构。

本书的独特之处在于它填补了半导体物理学与电力电子技术之间的空白，并为这些器件的用户提供了有力的支持。

两位作者过去 20 年里，一直努力在该领域收集资料，并以可读的形式展示给读者。他们致力于应用和推广这一新技术，因此特别值得给予嘉奖。非常幸运，两位作者都参与了全系列功率 IGBT 新型应用的研发，而且参与了 IGBT 驱动和保护设计的定型，同时也熟悉高性能 IGBT 的测量手段及应用系统。

本书将有助于学生认识当前主要功率半导体器件及其应用，并可以帮助电力电子变换器研发工程师全面而清晰地学习 IGBT 模块的选型、计算和应用。

在这里，我对作者的辛苦工作表示由衷的感谢，并祝愿本书能够成为电力电子领域新的里程碑和研发的标杆。

Leo Lorenz 教授
IEEE Fellow
科学院院士
慕尼黑，2010 年夏

前言

自 20 世纪 80 年代以来, IGBT 技术得到迅速发展。IGBT 作为标准组件广泛地应用于功率范围从几百瓦到几兆瓦的电力电子设备中。在 IGBT 的发展进程中, IGBT 的封装形式多种多样, 如分立元件单管 TO-247 封装、大功率模块封装以及其他同时包含 IGBT、电子元器件、特定功能的复杂设计封装。

本书的主要目的是使读者能够更容易地理解 IGBT 的基本特性以及 IGBT 和电力电子应用之间的相互作用关系。有些著作往往忽略了 IGBT 的一些实用细节和专业知识, 或者在某种程度上没有清晰地解释 IGBT 和实际应用之间的关系。本书汇集了有关 IGBT 在电力电子应用中的详细资料, 并通过作者在该领域的经验对其进行补充和完善。

本书首先介绍了 IGBT 的内部结构, 然后通过电路原型或基本模型推导出的 IGBT 变体形式, 并在此基础上探讨了 IGBT 的封装技术。本书还讨论了 IGBT 的电气特性和热问题, 分析了 IGBT 的应用特性、并联驱动技术、实际开关特性、电路布局、应用实例以及设计规则。同时还考虑了电力电子应用中涉及的工程测量技术和信号电子学。最后从电力电子装置的质量和可靠性方面探讨了对 IGBT 和 IGBT 模块的需求。

在各章的介绍中, 本书试图尽可能形象化地来表述, 尽量避免采用过多的公式, 所以本书的图形和表格超过了 500 张。然而, 如果公式能够更清楚地解释一些基本原理或者与常用的 IGBT 密切相关, 也会采用公式来进行表述。我们希望借此获得理论分析和实践应用之间的平衡。

感谢我们的家人和朋友, 因为本书花费了我们几年有限的业余时间。

感谢 Leo Lorenz 教授、Jost Wendt、Hubert Ludwig 和 Martin Hierholzer, 同时还要感谢英飞凌科技有限公司, 正是在他们的帮助下本书才得以完成。

虽然作者已经精心编写本书, 但是仍可能存在一些缺漏和错误, 欢迎批评和指正。

安德烈亚斯·福尔克
迈克尔·郝康普
瓦尔施泰因, 2010 年夏

目 录

译者序

序

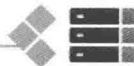
前言

第1章 功率半导体	1
1.1 简介	1
1.1.1 本征载流子浓度	2
1.1.2 掺杂	4
1.1.3 载流子在半导体中的运动	6
1.1.4 载流子的产生与复合	8
1.1.5 PN结	9
1.1.6 反向击穿	12
1.1.7 制造工艺	13
1.2 二极管	16
1.2.1 快恢复二极管	17
1.2.2 电源(整流)二极管	19
1.2.3 肖特基二极管	19
1.2.4 齐纳二极管与雪崩二极管	20
1.3 晶闸管	21
1.4 双极结型晶体管和场效应晶体管	22
1.4.1 双极结型晶体管(BJT)	22
1.4.2 场效应晶体管(FET)	24
1.5 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	28
1.5.1 穿通(PT)型IGBT	32
1.5.2 非穿通(NPT)型IGBT	34
1.5.3 场终止(FS)型IGBT	35
1.5.4 沟槽栅(Trench)IGBT	35
1.5.5 载流子储存沟槽栅 双极晶体管(CSTBT TM)	37
1.5.6 注入增强栅晶体管(IEGT)	38
1.5.7 沟槽栅场终止IGBT (Trench-FS IGBT)	38
1.5.8 逆导型IGBT(RC IGBT)	38
1.5.9 IGBT集成的额外功能	39
1.6 前景展望	41
1.7 制造商	43
本章参考文献	44
第2章 IGBT器件结构	47

2.1 简介	47
2.2 IGBT模块的材料	48
2.2.1 塑料框架	48
2.2.2 衬底	50
2.2.3 基板	51
2.2.4 塑模材料、环氧树脂和硅胶	52
2.3 电气键合工艺	53
2.3.1 内部电气连接技术	54
2.3.2 外部电气连接技术	60
2.4 设计理念	69
2.4.1 标准IGBT模块	69
2.4.2 压接式IGBT	69
2.4.3 智能功率模块(IPM)	70
2.4.4 IGBT模制模块	71
2.4.5 分立式IGBT	72
2.4.6 套件	73
2.5 半导体的内部并联	74
2.6 低感设计	76
2.7 IGBT模块的电路拓扑	77
2.8 IGBT绝缘配合	79
2.8.1 电气间隙和爬电距离	80
2.8.2 绝缘电压	82
2.8.3 局部放电	83
2.9 制造商概览	84
本章参考文献	85
第3章 电气特性	87
3.1 简介	87
3.2 二极管的正向特性	94
3.3 二极管的开关特性	96
3.3.1 二极管的开通	96
3.3.2 二极管的关断	98
3.4 IGBT的正向特性	101
3.5 IGBT的开关特性	103
3.5.1 IGBT的开通特性	103
3.5.2 IGBT的关断特性	105
3.5.3 栅极电荷和米勒效应	106
3.5.4 NPT IGBT与沟槽栅IGBT关断	



特性比较分析	107	6.4.1 自举电路	174
3.6 短路特性	108	6.4.2 DC-DC 变换器	176
3.7 阻断特性	111	6.4.3 欠电压闭锁	179
3.8 静态和动态雪崩击穿	112	6.5 耦合电容	180
3.9 杂散电感	113	6.6 影响开关特性的参数	181
3.10 不同的半导体来源	115	6.6.1 栅极电阻	181
本章参考文献	116	6.6.2 栅-射极的外接电容 C_G	183
第4章 热原理	118	6.6.3 栅极引线电感	186
4.1 简介	118	6.7 保护措施	187
4.1.1 定义	118	6.7.1 U_{CESat} 的监控	187
4.1.2 热传导	119	6.7.2 集-射极钳位	195
4.1.3 热辐射	123	6.7.3 栅极钳位	204
4.1.4 对流	125	6.7.4 密勒钳位	207
4.2 材料以及导热性能	126	6.7.5 利用发射极的寄生电感	209
4.3 热模型	131	6.7.6 两电平关断	210
4.4 散热器	136	6.7.7 软关断	212
4.4.1 空冷散热器	137	6.8 逻辑功能	212
4.4.2 液冷散热器	138	6.8.1 最小脉冲抑制	213
本章参考文献	140	6.8.2 死区生成和半桥互锁	213
第5章 模块数据手册	141	6.8.3 错误消息, 阻断时间和故障 存储	214
5.1 简介	141	6.9 安全停止	214
5.2 IGBT	141	6.10 并联和串联	216
5.3 续流二极管	144	6.10.1 并联	216
5.4 整流二极管 (PIM/CIB 模块)	145	6.10.2 串联连接	217
5.5 制动斩波器 (PIM/CIB 模块)	145	6.11 三电平 NPC 电路	217
5.6 负温度系数热敏电阻 (可选)	146	6.12 综合性能和成本选择驱动器	218
5.7 模块	147	6.13 制造商概述	219
5.8 图表	148	本章参考文献	219
5.9 电路的拓扑结构	149	第7章 实际应用中的开关特性	221
5.10 封装图	149	7.1 简介	221
本章参考文献	150	7.2 IGBT 的控制电压	221
第6章 IGBT 驱动	151	7.2.1 正电压控制	221
6.1 简介	151	7.2.2 负电压控制和 0V 关断	222
6.2 信号传输	152	7.3 最小开通时间	225
6.2.1 电平转换	152	7.4 死区	227
6.2.2 光电耦合器	156	7.5 开关速度	228
6.2.3 脉冲变压器	157	7.6 短路关断	229
6.2.4 电容耦合器	160	7.7 杂散电感的影响	233
6.2.5 光纤	161	7.7.1 换流通路杂散电感	233
6.2.6 总结	162	7.7.2 栅极通路杂散电感	235
6.3 IGBT 栅极驱动器	163	7.8 安全工作区	236
6.4 驱动器电源	173	7.8.1 IGBT 反偏安全工作区和短路	



安全工作区	236	11.3.3 升降压型变换器	292
7.8.2 二极管安全工作区	237	11.3.4 H 桥电路	293
7.9 IGBT 反向阻断电压	237	11.4 DC-AC 逆变器	294
7.10 集成碳化硅续流二极管的硅 IGBT	238	11.4.1 电压源逆变器	294
7.11 降载开关和(准)谐振开关	240	11.4.2 多电平逆变器	296
7.11.1 缓冲电路	240	11.4.3 电流源逆变器	299
7.11.2 谐振开关	244	11.4.4 Z 源逆变器	299
本章参考文献	246	11.5 AC-AC 变换器	303
第 8 章 IGBT 模块的并联和串联	247	11.6 应用举例	305
8.1 简介	247	11.6.1 伺服驱动	305
8.2 并联	247	11.6.2 不间断电源	305
8.2.1 静态工作注意事项	248	11.6.3 太阳能逆变器	307
8.2.2 动态工作注意事项	251	11.6.4 风能逆变器	308
8.2.3 栅极驱动并联	253	11.6.5 牵引逆变器	310
8.2.4 外部平衡组件并联连接	259	11.6.6 开关磁阻电动机	311
8.3 串联	262	11.6.7 中压逆变器	312
本章参考文献	264	本章参考文献	313
第 9 章 射频振荡	265	第 12 章 信号测量和仪器	315
9.1 简介	265	12.1 简介	315
9.2 短路振荡	266	12.2 数字存储示波器	315
9.3 IGBT 关断振荡	267	12.3 电流测量	317
9.4 拖尾电流振荡	268	12.3.1 基于无磁原理的电流测量	318
本章参考文献	270	12.3.2 基于电磁原理的电流测量	325
第 10 章 机械安装指导	271	12.4 电压测量	330
10.1 简介	271	12.5 温度测量	332
10.2 连接技术	271	12.6 双脉冲测试	337
10.2.1 电气连接	271	本章参考文献	340
10.2.2 散热器安装和导热硅脂	272	第 13 章 逆变器设计	341
10.2.3 直接冷却模块安装	276	13.1 简介	341
10.3 环境影响	277	13.2 逆变器的组成	341
10.3.1 机械负载	277	13.3 电压等级	342
10.3.2 气体和液体	278	13.4 寄生元件	343
10.4 运输与储存	279	13.5 直流母线	344
本章参考文献	279	13.6 吸收电容	346
第 11 章 基本电路与应用实例	280	13.7 驱动单元安装	348
11.1 简介	280	13.8 电气间隙和爬电距离	350
11.2 AC-DC 整流器和制动斩波器	281	13.9 电机电缆长度的影响	350
11.2.1 主动前端	287	13.10 滤波器	352
11.2.2 维也纳整流器	288	13.10.1 电源滤波器	352
11.3 DC-DC 变换器	289	13.10.2 直流母线滤波器	353
11.3.1 降压型变换器	290	13.10.3 输出滤波器	354
11.3.2 升压型变换器	291	13.11 熔断器	355



13.12 调制算法的影响	357	14.5 提高负载周次能力的措施	376
13.13 基本公式	361	14.5.1 CTE 值匹配	377
13.13.1 输入整流	361	14.5.2 DCB	377
13.13.2 输出逆变	362	14.5.3 低温连接	378
13.13.3 直流母线	362	14.5.4 芯片焊层的扩散焊接	379
本章参考文献	362	14.5.5 提高系统焊接层工艺	379
第14章 质量与可靠性	364	14.5.6 直接键合陶瓷到基板	379
14.1 简介	364	14.5.7 铜绑定线	380
14.2 应用中的失效机理	365	14.6 寿命计算	382
14.3 加速模型	367	14.7 失效图片	385
14.4 型式试验和常规试验	370	14.7.1 工艺与机械原因所致的失效 图像	385
14.4.1 HTRB 测试	372	14.7.2 电和热引起的失效图像	386
14.4.2 HTGS 测试	372	14.8 宇宙粒子射线	386
14.4.3 H3TRB 测试	372	本章参考文献	388
14.4.4 TST	373	附录 名词术语缩写	390
14.4.5 TC 测试	373		
14.4.6 PC 测试	374		

第 1 章

功率半导体

1.1 简介

目前，种类繁多的功率半导体器件已经成为人们日常生活一个重要组成部分。除其他用处之外，功率半导体器件使得变频马达驱动装置广泛地应用于日常消费产品（如洗衣机），工业领域（如泵）和交通运输（例如电力机车）中。

功率半导体器件可分为两大类：可控和不可控功率半导体。第一类主要包括晶闸管，双极型晶体管，功率 MOSFET，最后但同样重要的是 IGBT。第二类包括各种类型的功率二极管。图 1.1 给出了常见功率半导体器件及其典型的功率范围、阻断电压和开关频率。

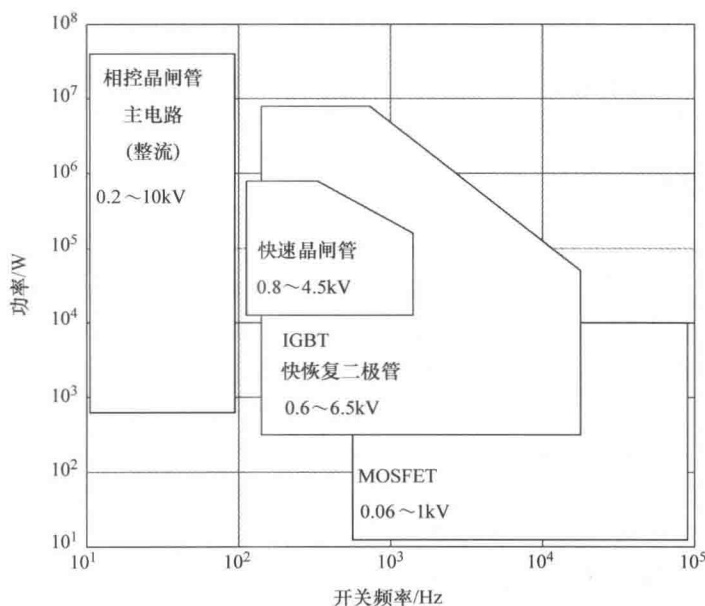


图 1.1 常见功率半导体器件及其典型的功率范围、阻断电压和开关频率

晶闸管在半导体器件尤其是在大功率应用中占据主导地位已有几十年的历史。但自从 20 世纪 80 年代以来，IGBT 在几个兆瓦的功率范围内逐步占据优势。

IGBT 是基于其他功率半导体器件的结构或半导体的基本机理，其基本结构如图 1.2 所示，它包括以下部分：



- 三个 PN 结 J_1, J_2, J_3 ;
- 一个 PNP 型晶体管 VT_1 ;
- 一个 NPN 型晶体管 VT_2 ;
- 一个二极管 VD_1 ;
- 一个晶闸管 V_1 ;
- 一个 MOSFET 结构 VT_3 ;
- 两个相邻 IGBT 单元之间的一个 JFET 结构 VT_4 。

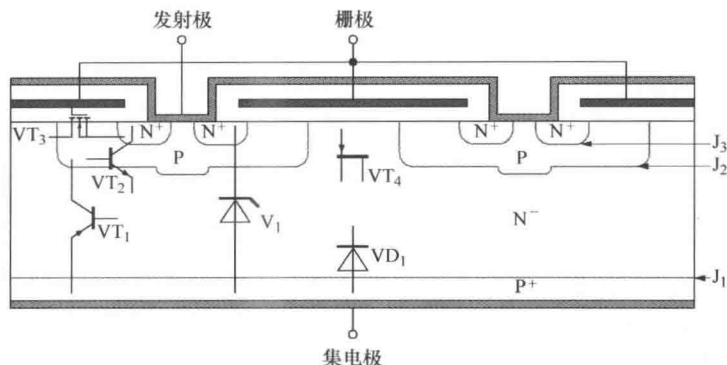


图 1.2 IGBT 基本结构（图中给出了两个相邻的 IGBT 单元）

对于理解 IGBT 来说，图中每个器件都同等重要，因此有必要针对每个独立的器件进行详细分析，然后再论述不同类型的 IGBT 设计方法。在此之前，简要地引入一些与本书相关的半导体物理学的概念，以便进一步的分析。

1.1.1 本征载流子浓度

根据泡利不相容原理，自由原子[⊖]的电子由它们自身的量子数决定了它们只能保持某一特定的状态。如果两个或多个原子移动的非常接近，形成晶状结构，某个原子最外层的电子将暴露于其他原子的电场中，使得这些电子进入特定的能量状态。在（半导体）晶状结构中，由于众多原子彼此相互作用、叠加形成一个能带结构。能带的宽度取决于该原子及其电子之间的关联强度。例如，牢固结合的电子与相邻的原子相互作用较弱，形成窄能带。

能带通常由间隙分隔开。在 $T=0K$ 时，最高层充满电子的能带具有的能量低于费米能级[⊖] E_F 时被称为价带，价带顶能量为 E_V 。即使电子能够在价带内改变位置，也无法实现电荷的传输，所以价带本身无益于电导率的提高。能带高于费米面时，不同于价带，由于没有布满电子或者处于空缺的状态，这时被称为导带，导带底能量为 E_C 。价带和传导带之间的

- ⊖ 根据传统物理学，两个粒子不能处于完全相同的状态，但是在量子力学中，情况就迥然不同。量子力学通过概率函数来描述粒子的状态，所以粒子（如电子）可以处于相同的量子态。泡利不相容原理也给出了一定的限制条件，即占据相同量子态的粒子之间必须至少有一个量子数与其他粒子不同。量子数包括自旋（自旋量子数 s ），轨道（主量子数 n 和次量子数 l ）和角动量（磁量子数 M ）。两个电子至少存在一个不同的量子数，即为泡利不相容原理，由奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利（1900~1958）提出。
- ⊖ 费米能级以意大利物理学家恩里科·费米（1901~1954）的名字命名，它描述了在绝对零度的温度下，包括电子在内的费米子充满能级所需要的能量阈值。



空间被称为禁带，代表了电子禁区，即根据泡利不相容原理在该区域中没有电子的存在，禁带宽度为 E_g 。 E_g 、 E_C 和 E_V 的关系为

$$E_g = E_C - E_V \quad (1.1)$$

式中， E_g 为禁带宽度 (eV)^①； E_C 为导带底能量 (eV)； E_V 为价带顶能量 (eV)。

如果导带没有被价电子占据，则材料不具有导电性。通过外部供给能量，例如热或光 (光子) 的影响下，有可能使得电子从价带跃迁到导带中，当然其前提是电子所获得的能量大于禁带宽度。这些载流子与价带中的空穴^②一起提高了材料的导电性。

在绝缘体 (如云母，玻璃，PVC) 和半导体 (如硅，锗) 中，价带与导带是由禁带隔开。在绝对零度时，导带无法被价电子占据，因而不存在导电性。因此，如图 1.3 所示，半导体和绝缘体之间的唯一区别在于禁带更小。但是，在导体 (如铜，铝，银) 中导带和价带紧靠在一起甚至部分重叠，也就是在导带中存在自由载流子，且不存在禁带。

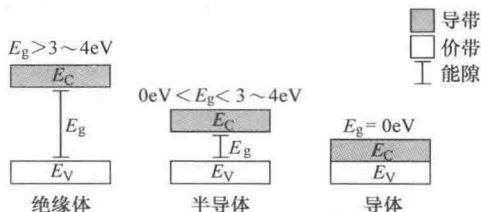


图 1.3 价带和导带

禁带宽度随着温度的变化而改变，在 $T = 0\text{K}$ 时出现最大值。如果温度上升，在固态物体内会产生热振动，随之会影响到能带。温度越高，热运动越强烈，同时能带之间的间隙会变小，同样价带和导带之间的间隙也会减小。Y. P. Varshni^[2] 的研究描述了该现象：

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \times T^2}{T - \beta} \quad (1.2)$$

式中， $E_g(0)$ 为在 $T = 0\text{K}$ (eV) 的禁带宽度； α 、 β 为与材料相关的经验系数。

图 1.4 给出了硅材料禁带宽度与绝对温度的关系。当 $\alpha = 4.37 \times 10^{-7} \text{ eV/K}$ ， $\beta = 636\text{K}$ 时， $E_g(0)$ 为 17eV 。

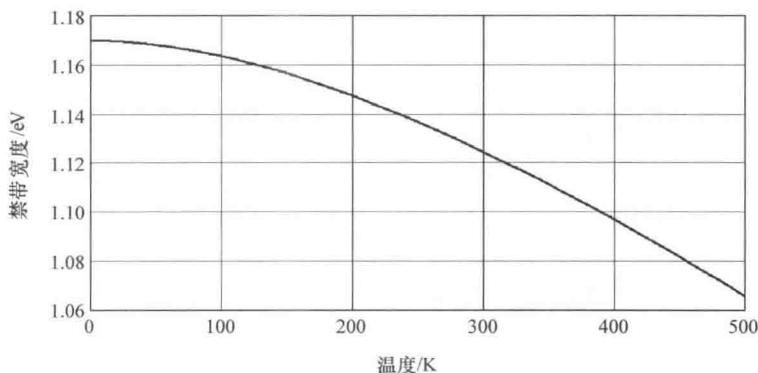


图 1.4 硅材料禁带宽度 E_g 与温度之间的关系曲线

① 下文仅仅列出了这些参数，之前也并未在书中进一步的阐述。

② 本文中并没有采用空穴，而是采用缺陷电子来描述正电荷载流子。



电子 $F_n(E)$ 在导带及空穴 $F_p(E)$ 在价带中的统计分布可以利用麦克斯韦 - 玻尔兹曼^① 概率函数简化为温度 T 的函数

$$F_n(E) = e^{\frac{E_C - E_F}{k \cdot T}} \quad (1.3)$$

$$F_p(E) = e^{\frac{E_F - E_V}{k \cdot T}} \quad (1.4)$$

式中, $F_n(E)$ 为电子在导带中的概率分布 (无单位); $F_p(E)$ 为空穴在价带中的概率分布 (无单位); E_F 为费米能级 (eV); k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

分布概率与状态密度 N_C 或 N_V 乘积就是电子和空穴在各自相应能带中的浓度:

$$n = N_C \cdot F_n(E) = N_C \cdot e^{\frac{E_C - E_F}{k \cdot T}} \quad (1.5)$$

$$p = N_V \cdot F_p(E) = N_V \cdot e^{\frac{E_F - E_V}{k \cdot T}} \quad (1.6)$$

式中, n 为电子浓度 (cm^{-3}); p 为空穴浓度 (cm^{-3}); N_C 为导带态密度 (cm^{-3}); N_V 为价带态密度 (cm^{-3})。

该浓度描述了能带中可能存在的载流子数量, 根据泡利不相容原理也可以由量子数表示。反过来, 这些都是与温度相关的函数:

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_n^* \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.7)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_h^* \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.8)$$

式中, m^* 为电子或空穴的有效质量 (kg)^②; h 为普朗克常数^③, $h = 6.62607 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

受到外部能量激励的电子可以摆脱价带的束缚而进入导带, 而在价带中产生相应的空穴。这意味着电子和空穴的数量保持平衡, 因此:

$$n_i = p = n \quad (1.9)$$

式中, n_i 为本征载流子浓度 (cm^{-3})。

式 (1.5) 和式 (1.6) 相乘, 然后代入式 (1.1) 就得到所谓的质量作用定律:

$$n_i^2 = n \cdot p = N_C \cdot e^{\frac{E_C - E_F}{k \cdot T}} \cdot N_V \cdot e^{\frac{E_F - E_V}{k \cdot T}} = N_C \cdot N_V e^{\frac{E_g}{k \cdot T}} \quad (1.10)$$

式 (1.10) 中的载流子浓度由于文献来源不同而得到不同的结论。一些参数微小的变动导致了这些差异, 比如禁带宽度 $E_g(T)$ 和有效质量 m^* 。当然多数情况下都可以简化分析。图 1.5 给出了硅材料本征载流子的浓度与温度的关系函数, 它们是来自不同参考文献^[1,3,4] 的一些代表性的结论。

在本书中, 300K 时硅材料载流子浓度设为 $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

1.1.2 掺杂

在半导体材料中混入不同价元素, 可以提高其导电率。这种向半导体中有目的的引入其

① 以苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (1831 ~ 1879) 和奥地利物理学家玻尔兹曼 (1844 ~ 1906) 命名。

② 有效质量 m^* 描述在特定材料内, 加速的粒子因为量子力学效应而表现出的质量。在导带中电子的有效质量大于实际静止质量, 而在价带中的空穴则比它们的实际静止质量小。

③ 以德国物理学家马克斯恩斯特·卡尔·路德维希·普朗克 (1858 ~ 1947) 的名字命名。

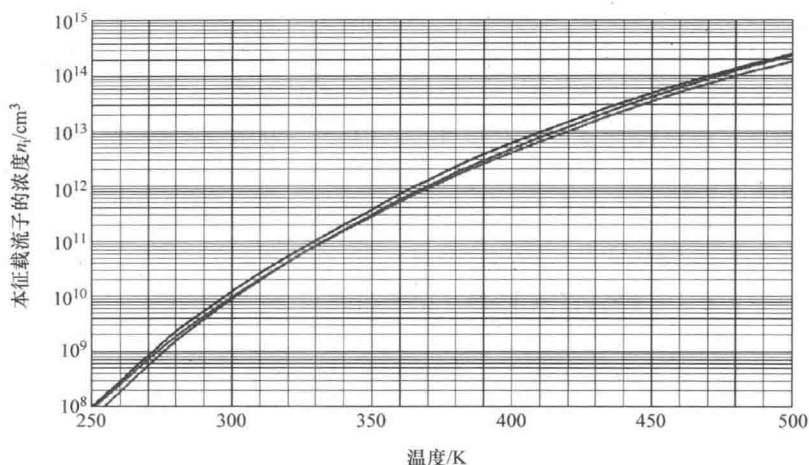
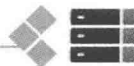


图 1.5 硅材料本征载流子的浓度与温度的关系函数

他元素的行为称为掺杂，可以通过扩散、离子注入或中子辐射的方式实现半导体掺杂。比如在硅材料（四价元素）中掺杂磷（五价元素），则会引入额外可移动的负电荷。磷元素因为可以提供一个电子而被称为施主，如图 1.6a 所示。在硅半导体中掺三价硼元素可以产生类似的效果，由于硼原子可以接受一个额外的电子，所以在半导体中产生的是带正电荷的空穴，如图 1.6b 所示。只要半导体的温度没有达到使得本征载流子浓度 n_i 超过由于掺杂产生的载流子浓度的临界值，半导体的导电性能依然由掺杂决定。随着温度的上升，如果本征载流子浓度 n_i 达到和掺杂产生的载流子浓度接近，本征载流子决定了半导体的特性。随着温度的进一步升高，半导体就可能面临热失控的问题。

半导体中可移动的自由电子占主导的区域被称为 N 区，同样空穴占主导的区域被称为 P 区。应当注意的是，N 区和 P 区都是电中性的，无论是五价的磷还是三价的硼元素，都会产生相应的正电荷或负电荷补偿相应的多数载流子。由上可知，式 (1.10) 同样适用于掺杂半导体。

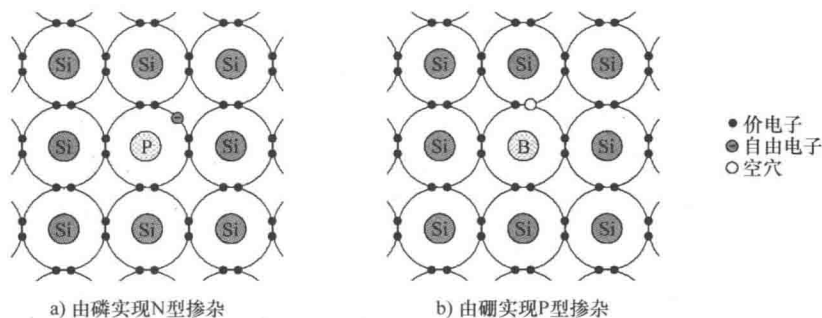


图 1.6 硅材料的掺杂

在半导体器件的原理图中，掺杂用符号 N, P, N^- , P^- , N^+ , P^+ 表示，下面的原则普遍适用：

- N^- , P^- 掺杂浓度近似在 $10^{12} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ；
- N, P 掺杂浓度近似在 $10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ；