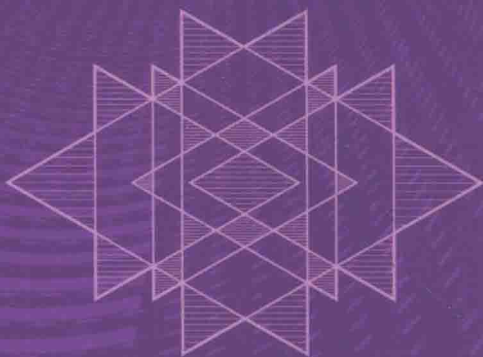


集成功率器件设计 及TCAD仿真

Integrated Power Devices
and TCAD Simulation
(Devices, Circuits, and Systems)



[加拿大]

付越 (Yue Fu)

李占明 (Zhanming Li)

吴卫东 (Wai Tung Ng)

约翰尼 K.O.辛 (Johnny K.O. Sin)

杨兵

著

译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

微电子与集成电路先进技术丛书

集成功率器件设计及 TCAD 仿真

付越 (Yue Fu)

[加拿大]

李占明 (Zhanming Li)

吴卫东 (Wai Tung Ng)

约翰尼 K. O. 辛 (Johnny K. O. Sin)

著

杨兵 译



机械工业出版社

Integrated Power Devices and TCAD Simulation / by Yue Fu , Zhanming Li, Wai Tung Ng , Johnny K. O. Sin / ISBN: 9781466583818

Copyright © 2014 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版. 版权所有, 侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2015-6626 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

集成功率器件设计及 TCAD 仿真/(加)付越 (Yue Fu) 等著, 杨兵译.
—北京:机械工业出版社, 2018.5

(微电子与集成电路先进技术丛书)

书名原文: Integrated Power Devices and TCAD Simulation

ISBN 978-7-111-59273-0

I. ①集… II. ①付… ②杨… III. ①集成电路-功率半导体器件-计算机辅助设计 IV. ①TN303-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 036499 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: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧

责任校对: 刘雅娜 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 李 飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 21 印张 · 4 插页 · 393 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59273-0

定价: 125.00 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

本书从电力电子到功率集成电路 (PIC)、智能功率技术、器件等方面给电源管理和半导体产业提供了一个完整的描述。本书不仅介绍了集成功率半导体器件,如横向双扩散金属氧化物半导体场效应晶体管 (LDMOSFET)、横向绝缘栅双极型晶体管 (LIGBT) 和超结 LDMOSFET 的内部物理现象,还对电源管理系统进行了一个简单的介绍。本书运用计算机辅助设计技术 (TCAD) 仿真实例讲解集成功率半导体器件的设计,代替抽象的理论处理和令人生畏的方程,并且还探讨了下一代功率器件,如氮化镓高电子迁移率功率晶体管 (GaN 功率 HEMT)。本书内容有助于填补功率器件工程和电源管理系统之间的空白。书中包括智能 PIC 的一个典型的工艺流程以及很难在其他同类书中找到的技术开发组织图,通过对本书的阅读,可以使学生和年轻的工程师在功率半导体器件领域领先一步。

本书可作为高等院校功率器件工程、电子科学与技术、电子与信息工程等专业高年级本科生和研究生有关集成功率器件方面课程的教材或参考书,也可作为相关领域专业人士的参考书。

译 者 序

集成电路的飞速发展给功率器件和电源管理 IC 的发展带来了新的机遇，特别是随着绿色能源诸如风能和太阳能的大量采用，以及新能源汽车的推广，再到与我们生活相关的各种电子产品，对功率器件和电源管理 IC 研究和开发提出了越来越高的要求。功率器件和电源管理 IC 的核心是器件物理，然而器件物理特性的人工分析和认识十分困难。TCAD 的出现使得通过计算机平台仿真实际的物理效应成为可能，这大大简化了功率器件分析与设计的过程，成为相关专业学生和工程技术人员学习和研究功率器件的重要手段。

这本书是 Yue Fu 博士、Zhanming Li 博士、Wai Tung Ng 博士和 Johnny K. O. Sin 博士在从事功率器件教学与研究基础上编写而成的。内容包括电源转换器、电源管理 IC、智能功率 IC 技术、TCAD 工艺仿真、TCAD 器件仿真、功率 IC 的工艺流程 TCAD 仿真、集成的功率半导体器件的 2D/3D 仿真，以及新型 GaN 功率器件的介绍。

本书共分为 10 章。第 1 章介绍功率电子学中 DC/DC 变换器、线性电压调节器、非隔离/隔离开关变换器的拓扑结构以及电源管理系统。第 2 章讨论动态电压调节 (DVS) 技术并通过两个电源管理 IC 的例子说明如何实现这一目的。第 3 章介绍了半导体行业发展的历程和各个环节以及新摩尔定律。第 4 章介绍智能功率 IC 技术中的器件、设计和制造中需要考虑的因素。第 5 章介绍 TCAD 工艺仿真。第 6 章介绍 TCAD 器件的仿真及仿真各种效应所要采用的模型。第 7 章讨论功率 IC 工艺流程中形成各个功能结构的 TCAD 仿真。第 8 章讨论 PN 结二极管、双极型晶体管和 LDMOS 等几种基本功率器件的 TCAD 仿真。第 9 章讨论 LIGHT、超结 LDMOS、超结功率 FinFET 等几种功率器件和大的互联的 TCAD 的 3D 仿真。第 10 章介绍了在未来功率器件应用中具有应用前景的新型 GaN 功率器件。

与市面上同类书籍不同，本书将理论和功率器件的 TCAD 仿真结合起来，通过大量的仿真结果实例，使得读者更容易理解功率器件和电源管理 IC 设计和制造中所要涉及的物理知识。本书可作为高等院校功率器件、电子科学与技术、电子与信息工程等专业高年级本科生和研究生有关集成功率器件方面课程的教材或参考书，也可作为相关领域专业人士的参考书。

限于译者的水平，本书翻译可能存在一些不当之处，欢迎读者提出宝贵的修改意见和建议。

IV 集成功率器件设计及 TCAD 仿真

这里还要感谢机械工业出版社同仁的支持，才使得本书顺利与读者见面，在此谨致谢意。

北方工业大学

杨 兵

2018 年 2 月

原书前言

从 20 世纪 40 年代末晶体管的发明开始，晶体管主要沿着两个方向，即器件的小型化以及性能改进发展。性能改进的关键参数之一是晶体管的额定功率，它的发展导致功率半导体领域的产生。因为所有的电子器件都需要一个合适工作的电源和电源管理电路，功率半导体领域是过去几十年晶体管发展的一个重要领域。

近年来，器件小型化使得最小特征尺寸接近纳米级，而目前的超大规模集成电路（ULSI）技术能够把数十亿个晶体管集成在一个芯片上，这在芯片供电时会产生严重的问题。此外，由于环境问题需要更高的功率效率，也给系统的电源管理和电源电路带来了沉重的负担。这些和其他相关问题推动了功率半导体器件与技术领域的持续研究。

功率半导体领域发展的重点是针对高额定功率的分立功率器件。典型结构是双极型功率晶体管和晶闸管。由于这些器件缓慢的开关速度和较大的开关损耗，发明了快速开关器件，如垂直双扩散 MOS（VDMOS）晶体管，而应对较小的功率损耗，发明了绝缘栅双极型晶体管（IGBT）。随着集成电路（IC）技术应用越来越普遍，推动了集成功率晶体管与控制 IC 的低成本、结构紧凑和高性能的应用。为了实现这一目标，开发了横向双扩散 MOS（LDMOS）晶体管和横向绝缘栅双极型晶体管（LIGBT）。这是功率 IC（PIC）技术发展的黄金时代，并开发出了不同的双极 CMOS DMOS（BCD）技术。

伴随如今发达的 ULSI 和 PIC 技术，预计片上功率系统（Power SOC）的发展对未来的消费和工业应用将是一个非常有前途的方向。当然，要实现这一目标，实现高性能单片无源元件的各种其他技术，也需要有效的无源元件和 IC 集成以及有效的功耗技术。

PIC 技术的开发，无论是高性能的横向功率晶体管还是工艺技术都是必需的。对半导体器件和工艺技术的高效设计，在业界常用到计算机辅助设计技术（TCAD）工具。市面上已经出版了一些关于功率器件设计和工艺开发的书籍，但没有特别关注如何利用 TCAD 工具设计和开发功率器件和 PIC 的。本书目的是满足这方面的需要，特别是刚刚进入功率半导体领域的工程师，对采用 TCAD 工具对器件和工艺进行设计和开发提供一个快速入门的途径。

本书采用了自上而下的方法，引领新的工程师进入到该领域。它从基本的电

VI 集成功率器件设计及 TCAD 仿真

力电子系统开始，同时介绍了功率 IC，并在进入智能功率集成电路技术之前引导读者探索半导体产业，然后解释基本工艺和器件模拟的 TCAD 建模，并讨论了具体制造过程的精确和可靠模拟结果的模型校准，然后对如何利用 TCAD 工具进行功率 IC 工艺开发和功率器件设计进行了详细介绍，这包括许多实际功率器件和工艺技术与工业设计有关的 TCAD 方法和过程的仿真实例。超过 300 张的图示有效地说明了功率器件和设计的关键概念和技术。最后，简要介绍了 GaN 功率器件的 TCAD 仿真，特别是对那些具有硅技术背景的，刚开始从事这一领域的读者非常有帮助。

在本书的写作过程中，作者得到了很多人的帮助和支持。要对他们每一个人慷慨的帮助和支持表示衷心的感谢。特别要感谢 Crosslight Software 的 Michel Lestrade，在审阅和校对工作中做出了重要贡献；感谢不列颠哥伦比亚大学 Maggie Xia 和 Dr. Yuanwei Dong 教授对第 7 章工艺仿真和其他章节的审阅；感谢浙江大学 Gang Xie 教授对第 10 章关于 GaN 器件仿真模拟的审阅；感谢 Mega Hertz Power Systems 公司首席执行官 Robert Taylor 和 Greecon Technologies 公司的 Roumen Petkov 博士对第 1 章的审阅和建议；感谢飞兆半导体公司 (USA) Gary Dolny 博士和伊利诺理工大学的 John Shen 教授对全书初步审阅和建议。

最后，特别感谢 Taylor & Francis 的 Nora Konopka、Michele Smith、Kathryn Everett、Iris Fahrer 和 Theresa Delforn 专业和热情的帮助。

作者简介

Yue Fu 博士获得浙江大学学士学位和中佛罗里达大学博士学位。目前是加拿大 Crosslight Software 公司副总裁。Fu 博士是 IEEE 高级会员，有超过 10 年的功率半导体器件和电力电子行业和学术经验。他拥有多项美国专利，撰写或合著了许多论文。

Zhanming (Simon) Li 博士 1988 年获得了不列颠哥伦比亚大学博士学位。1988 ~ 1995 年，他在加拿大国家研究委员会 (NRCC) 开发半导体器件的仿真软件。1995 年他基于 NRCC 转让的仿真技术创立了 Crosslight Software 公司。自那时起，Li 博士一直是许多半导体工艺和器件仿真软件包的首席设计师。他一直积极参与 TCAD 仿真技术研究并撰写或合著论文达 70 余篇。

Wai Tung Ng 博士，分别于 1983 年、1985 年和 1990 年在多伦多大学电气工程专业获得学士、硕士和博士学位。1990 ~ 1991 年，他是 Dallas Texas Instruments 公司的一名技术人员。他的学术生涯从 1992 年始于香港大学。在 1993 年作为一名教职人员回到了多伦多大学，目前担任教授。他的研究工作集中在电源管理集成电路、集成的 DC/DC 变换器、智能功率集成电路、功率半导体器件和制造工艺。

Johnny K. O. Sin 博士，于 1988 年在多伦多大学电气工程系获得博士学位。1988 ~ 1991 年，在纽约的飞利浦实验室任高级研究人员。1991 年进入香港科技大学电子与计算机工程系并担任教授。他拥有 13 项专利，撰写了超过 270 篇技术论文。他的研究兴趣包括新型功率半导体器件和片上电力系统技术。由于对功率半导体器件设计和商业化的贡献，Sin 博士成为了 IEEE 会员。

目 录

译者序

原书前言

作者简介

第 1 章 电力电子, 可以实现绿色的技术	1
1.1 电力电子介绍	1
1.2 电力电子的发展历程	3
1.3 DC/DC 变换器	4
1.4 线性稳压器	4
1.5 开关电容 DC/DC 变换器 (电荷泵)	5
1.6 开关模式 DC/DC 变换器	6
1.7 线性稳压器、电荷泵和开关调节器的比较	8
1.8 非隔离 DC/DC 开关变换器的拓扑结构	8
1.8.1 Buck 变换器	9
1.8.2 Boost 变换器	11
1.8.3 Buck - boost 变换器	12
1.8.4 Cuk 变换器	14
1.8.5 非隔离式变换器额外的话题	14
1.9 隔离的开关变换器拓扑结构	16
1.9.1 反激式变换器	16
1.9.2 正激式变换器	17
1.9.3 全桥变换器	18
1.9.4 半桥变换器	19
1.9.5 推挽变换器	20
1.9.6 隔离 DC/DC 变换器其他话题	20
1.9.7 隔离 DC/DC 变换器拓扑结构的比较	22
1.10 SPICE 电路仿真	22
1.11 对于电池供电器件的电源管理系统	23
1.12 小结	24
第 2 章 功率变换器和电源管理芯片	25
2.1 用于 VLSI 电源管理的动态电压调节	25
2.2 集成的 DC/DC 变换器	27
2.2.1 分段的输出级	29

2.2.2 一个辅助级的瞬态抑制	32
2.3 小结	36
第3章 半导体产业和超摩尔定律	37
3.1 半导体产业	37
3.2 半导体产业的历史	38
3.2.1 一个简略的时间表	38
3.2.2 八叛逆	38
3.2.3 半导体产业的历史路线图	39
3.3 半导体产业的食物链金字塔	40
3.3.1 第1层: 晶圆和EDA 工具	41
3.3.2 第2层: 器件工程	42
3.3.3 第3层: IC 设计	42
3.3.4 第4层: 制造、封装和测试	43
3.3.5 第5层: 系统和软件	43
3.3.6 第6层: 市场营销	44
3.4 半导体公司	45
3.5 超摩尔定律	46
第4章 智能功率 IC 技术	49
4.1 智能功率 IC 技术基础	49
4.2 智能功率 IC 技术: 历史展望	50
4.3 智能功率 IC 技术: 产业展望	52
4.3.1 智能功率 IC 技术的工程组	52
4.3.2 智能功率 IC 技术开发流程	55
4.3.3 计划阶段	56
4.3.4 工艺集成和器件设计	57
4.3.5 布图、投片、制造和测试	58
4.3.6 可靠性和标准	59
4.3.7 目前智能功率技术的概述	60
4.4 智能功率 IC 技术: 技术展望	61
4.4.1 智能功率技术中的器件	62
4.4.2 智能功率 IC 技术的设计考虑	62
4.4.3 隔离方法	65
第5章 TCAD 工艺仿真介绍	67
5.1 概述	67
5.2 网格设置和初始化	67
5.3 离子注入	69
5.3.1 分析模型	70
5.3.2 多层注入	71

X 集成功率器件设计及 TCAD 仿真

5.3.3 Monte Carlo 模拟	71
5.4 淀积	72
5.5 氧化	73
5.5.1 干氧化	73
5.5.2 湿氧化	74
5.5.3 氧化模型	74
5.6 刻蚀	76
5.7 扩散	77
5.7.1 扩散机制	78
5.7.2 扩散模型	79
5.8 分凝	80
5.9 工艺模拟器模型的校准	83
5.10 3D TCAD 工艺仿真介绍	84
5.11 GPU 仿真	85
第 6 章 TCAD 器件仿真介绍	87
6.1 概述	87
6.2 器件仿真基础	87
6.2.1 漂移-扩散模型	87
6.2.2 离散化	88
6.2.3 Newton 方法	89
6.2.4 初始猜测和自适应偏置步长	89
6.2.5 收敛问题	90
6.2.6 边界条件	91
6.2.7 瞬态仿真	93
6.2.8 网格问题	93
6.3 物理模型	93
6.3.1 载流子统计	94
6.3.2 杂质的不完全电离	94
6.3.3 重掺杂效应	94
6.3.4 SRH 和 Auger 复合	94
6.3.5 雪崩击穿和碰撞电离	95
6.3.6 载流子迁移率	101
6.3.7 热和自加热	106
6.3.8 带隙变窄效应	107
6.4 AC 分析	107
6.4.1 引言	107
6.4.2 基本的公式	108
6.4.3 在 TCAD 中的 AC 分析	110

6.5 在 TCAD 仿真中的陷阱模型	111
6.5.1 陷阱电荷的状态	111
6.5.2 陷阱动力学	112
6.6 量子隧穿	115
6.6.1 功率器件中量子隧穿的重要性	115
6.6.2 TCAD 仿真的基本隧穿理论	116
6.6.3 隧穿的非平衡 Green 函数的介绍	118
6.7 器件仿真器模型的校准	119
第 7 章 功率 IC 工艺流程的 TCAD 仿真	120
7.1 概述	120
7.2 一个模拟的功率 IC 工艺流程	120
7.2.1 工艺流程步骤	120
7.2.2 模拟的工艺流程的结构视图	121
7.3 智能功率 IC 工艺流程模拟	122
7.3.1 P+ 衬底	122
7.3.2 N 型掩埋层	123
7.3.3 外延层生长和深 N 连接	125
7.3.4 高压双阱	127
7.3.5 N-LDMOS 的 P 型体注入	128
7.3.6 有源区面积/浅沟槽隔离 (STI)	129
7.3.7 N 阱和 P 阱	134
7.3.8 低压双阱	135
7.3.9 厚栅氧层和薄栅氧层	136
7.3.10 多晶栅	139
7.3.11 NLDD 和 PLDD	139
7.3.12 侧墙	141
7.3.13 NSD 和 PSD	142
7.3.14 后端工序	144
第 8 章 集成功率半导体器件的 TCAD 仿真	150
8.1 PN 结二极管	150
8.1.1 PN 结基础	150
8.1.2 在平衡时的横向 PN 结二极管	151
8.1.3 正向导通 (导通态)	153
8.1.4 一个 PN 结二极管的反向偏置	156
8.1.5 具有 NBL 的横向 PN 结二极管	156
8.1.6 PN 结二极管的击穿电压增强	158
8.1.7 反向恢复	166
8.1.8 Schottky 二极管	169

XII 集成功率器件设计及 TCAD 仿真

8.1.9 Zener 二极管	170
8.1.10 PN 结二极管的小信号模型	173
8.2 双极结型晶体管	174
8.2.1 NPN 型 BJT 的基本工作原理	175
8.2.2 NPN 型 BJT 的击穿	178
8.2.3 BJT 的 $I-V$ 曲线族	182
8.2.4 Kirk 效应	182
8.2.5 BJT 热失控和二次击穿的仿真	186
8.2.6 BJT 的小信号模型和截止频率的仿真	188
8.3 LDMOS	191
8.3.1 击穿电压的提高	191
8.3.2 LDMOS 中的寄生 NPN BJT	220
8.3.3 LDMOS 的导通电阻	222
8.3.4 LDMOS 的阈值电压	226
8.3.5 LDMOS 的辐照加固设计	227
8.3.6 LDMOS 的 $I-V$ 曲线族	228
8.3.7 LDMOS 的自加热	230
8.3.8 LDMOS 的寄生电容	231
8.3.9 LDMOS 的栅电荷	234
8.3.10 LDMOS 非钳位感应开关 (UIS)	235
8.3.11 LDMOS 的简洁模型	236
第 9 章 集成的功率半导体器件的 3D TCAD 模拟	238
9.1 3D 器件的布局效应	238
9.2 LIGBT 的 3D 仿真	241
9.2.1 关于 LIGBT	241
9.2.2 分段阳极 LIGBT	241
9.2.3 分段阳极 LIGBT 3D 工艺仿真	244
9.2.4 分段阳极 LIGBT 的 3D 器件仿真	246
9.3 超结 LDMOS	254
9.3.1 基本概念	254
9.3.2 超结 LDMOS 的结构	261
9.3.3 超结 LDMOS 的 3D 仿真	261
9.3.4 超结 LDMOS 的 3D 器件仿真	264
9.3.5 一个具有相同的 N 漂移区掺杂的标准 LDMOS 的 3D 仿真	265
9.3.6 一个 N 漂移区掺杂降低的标准 LDMOS 的 3D 仿真	265
9.3.7 超结 LDMOS 和标准 LDMOS 的比较	266
9.4 超结功率 FinFET	267
9.4.1 超结功率 FinFET 的工艺流程	269

9.4.2	超结功率 FinFET 的测量结果	270
9.4.3	超结功率 FinFET 的 3D 仿真	271
9.5	大的互连仿真	273
9.5.1	大的互连的 3D 工艺仿真	275
9.5.2	大的互连的 3D 器件仿真	279
第 10 章	GaN 器件介绍	281
10.1	化合物材料与硅	281
10.2	GaN 器件的衬底材料	282
10.3	Ⅲ-氮族纤锌矿结构的极化特性	283
10.3.1	微观偶极子与极化矢量	283
10.3.2	晶体结构与极化	284
10.3.3	零净极化的理想 c_0/a_0 比	284
10.4	AlGaIn/GaN 异质结	287
10.4.1	具有固定铝摩尔分数的能带图	288
10.4.2	具有一个固定的 AlGaIn 层厚度的能带图	289
10.4.3	具有掺杂的 AlGaIn 或 GaN 层的 AlGaIn/GaN 结构	291
10.4.4	具有金属接触的 AlGaIn/GaN 结构	292
10.5	在 AlGaIn/GaN 结构中的陷阱	293
10.6	一个简单的 AlGaIn/GaN HEMT	294
10.6.1	器件结构	294
10.6.2	GaN HEMT 的 $I_D - V_G$ 曲线	296
10.6.3	小结	297
10.7	GaN 功率 HEMT 例子 I	298
10.7.1	器件结构	298
10.7.2	GaN 材料的碰撞电离系数	300
10.7.3	GaN HEMT 器件的击穿仿真	300
10.8	GaN 功率 HEMT 范例 II	301
10.9	GaN HEMT 器件的栅极漏电流的仿真	302
10.9.1	器件结构	302
10.9.2	模型和仿真设置	303
10.9.3	栅极泄漏电流仿真	305
10.10	化合物半导体电力应用的市场前景	306
附录 A	载流子统计	308
附录 B	载流子统计	309
附录 C	陷阱动力学和 AC 分析	320

第 1 章 电力电子，可以实现绿色的技术

这本书采用自上而下的方式，所以读者就可以从系统级的应用开始，然后进入到集成电路（IC）芯片级，最后到半导体器件（元件）级。本章简要介绍了功率器件工程师涉及的电力电子和电源管理系统，特别专注于功率器件物理特性的电力电子工程师可以跳过这一章。

1.1 电力电子介绍

自从电的发现以来，电子装置几乎无处不在（现在甚至出现在火星上）。电源传输是电子设备中一个最重要的却经常被忽视的要求。交流电（AC）线电压直接被采用或无需进行功率变换的电池供电是罕见的。电子系统大部分时间所需的电能都是由内部或外部电源提供的。

环保概念现在主张推动绿色的环保意识，因此，节能技术正被考虑作为未来应用的一个重要的设计标准。各种形式的清洁能源，如太阳能和风能需要转换和储存使用。有效的能量转换是降低成本和更好地利用这些自然资源的关键。

使用固态器件控制和转换电功率的电力电子系统被认为是实现绿色未来的技术。美国能源部估计，约 40% 的所有能源消耗首选转换为电力，在运输部门越来越多地使用电动式和插电式混合动力汽车以及高速铁路运输的情况下，这个数字可能会增加到 60%^[1]。图 1-1 为插电式混合动力汽车中的电力电子系统。

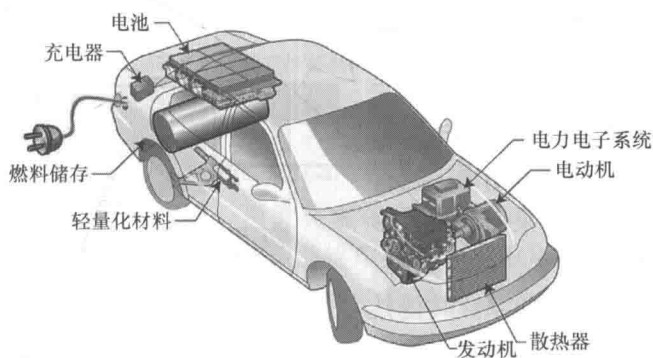


图 1-1 插电式混合动力汽车中的电力电子系统（美国 Argonne 国家实验室免费图样^[2]）

图 1-1 显示了电力电子系统在电动汽车上的应用。根据电压变换，电力电子

变换器可以被划分为 4 种类型：AC/DC 整流器、AC/AC 变换器、DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器。图 1-2 说明了这 4 种类型的变换器。电力电子 IC 的全面的论述超出本书的研究范围，因此我们关注 DC/DC 变换器。

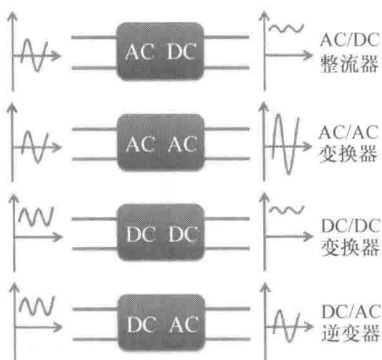


图 1-2 4 种不同类型的电源变换

一个完整的电力电子系统包含 3 部分（见图 1-3）。功率变换器拓扑控制功率元器件应如何连接和控制，该拓扑结构可以被视为是电力电子系统的基础。控制器根据输入输出条件自动监视和控制电源开关，是系统的大脑。功率元器件如功率器件、变压器、电感、电容是一个电源的基本构造模块，它们可以被视为电力电子系统的肌肉。

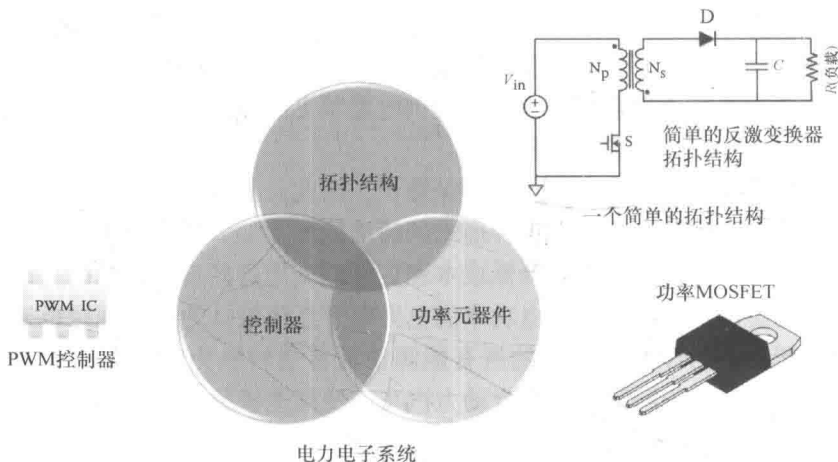


图 1-3 电力电子系统包括拓扑结构、控制器和功率元器件如功率器件、变压器、电感和电容

不幸的是，即使是最好的功率元器件也不一定占据全球市场的主导地位。在电力电子设计中，功率元器件和控制器的成功实施和采用受到许多因素的影响，如经济学、市场条件、知识产权和行业的供应关系，其他技术方面的因素，如 PCB 布局、磁性设计和优化滤波元件也都发挥了重要作用。

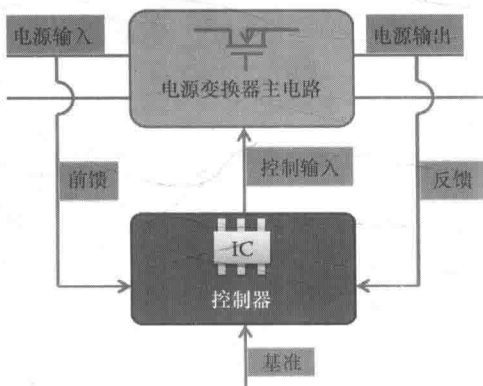


图 1-4 用于说明电力电子系统的一个黑盒子