

WILEY

EPC公司CEO、国际整流器公司原CEO
亚历克斯·利多博士权威著作

电子科学与工程系列图书

氮化镓功率晶体管 ——器件、电路与应用

(原书第2版)

GaN Transistors for Efficient Power Conversion
Second Edition

[美] 亚历克斯·利多 (Alex Lidow) 约翰·斯其顿 (Johan Strydom)

迈克尔·德·罗伊 (Michael de Rooij) 戴维·罗伊施 (David Reusch)

著

段宝兴 杨银堂 译



理解氮化镓 (GaN) 晶体管结构、特性和应用的实用指南,
包含大量应用实例, 提供配套学习资源

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电子科学与工程系列图书

氮化镓功率晶体管

——器件、电路与应用

(原书第2版)

[美] 亚历克斯·利多 (Alex Lidow)
约翰·斯其顿 (Johan Strydom) 著
迈克尔·德·罗伊 (Michael de Rooij)
戴维·罗伊施 (David Reusch)

段宝兴 杨银堂 译



机械工业出版社

Copyright © Alex Lidow, Johan Strydom, Michael de Rooij, and David Reusch

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled GaN Transistors for Efficient Power Conversion, Second Edition, ISBN 978 - 1 - 118 - 84476 - 2, by Alex Lidow, Johan Strydom, Michael de Rooij, and David Reusch, 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 Wiley 授权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 - 0863 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

氮化镓功率晶体管: 器件、电路与应用: 第2版 / (美) 亚历克斯·利多 (Alex Lidow) 等著; 段宝兴, 杨银堂译. —北京: 机械工业出版社, 2018.9

(电子科学与工程系列图书)

书名原文: GaN Transistors for Efficient Power Conversion, Second Edition
ISBN 978-7-111-60578-2

I. ①氮… II. ①亚…②段…③杨… III. ①氮化镓-功率晶体管-研究 IV. ①TN323

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 171129 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: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

责任校对: 樊钟英 封面设计: 马精明

责任印制: 常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.75 印张 · 298 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-60578-2

定价: 79.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

本书共包括 11 章：第 1 章概述了氮化镓（GaN）技术；第 2 章介绍了 GaN 晶体管的器件物理；第 3 章介绍了 GaN 晶体管的驱动；第 4 章介绍了 GaN 晶体管电路的版图设计；第 5 章讨论了 GaN 晶体管的建模和测量；第 6 章详细介绍了硬开关技术；第 7 章详细介绍了软开关技术和变换器；第 8 章介绍了 GaN 晶体管射频特性；第 9 章讨论了 GaN 晶体管的空间应用；第 10 章列举了 GaN 晶体管的应用实例；第 11 章分析了 GaN 晶体管替代硅功率晶体管的原因。

本书适合作为从事 GaN 功率半导体技术研究的科研工作者、工程师、高年级本科生和研究生的参考书，也可以作为高等院校微电子科学与工程专业和电力电子技术专业的教材。

译者序

半导体科学与技术引发了现代许多科技领域革命性的变革和进步，它是计算机、通信和网络技术的基础和核心，已经成为与国民经济发展、社会进步及国家安全密切相关的、重要的科学技术之一。半导体科学和技术和人们的日常生活息息相关，在产生巨大经济效益的同时，大大提高了人们的生活质量。因为半导体科学和技术综合了电子、信息、材料、物理、化学和数学等各门学科的精髓，所以它的发展速度非常惊人！促使信息、通信和计算机领域发生着巨大变革，已经成为一个国家科学技术的“基石”。

继第一代和第二代半导体技术之后发展起来的第三代宽禁带半导体材料与器件，是发展大功率、高频高温、抗强辐射、蓝光激光器和紫外探测器等技术的核心。由于众所周知的优良材料特性，使得第三代半导体技术成为近年来半导体研究领域的热点。氮化镓（GaN）功率半导体技术更有望成为功率半导体技术的“继承者”之一。

本书是一本系统全面介绍 GaN 功率半导体技术的专著。作者之一的 Alex Lidow 博士是宜普电源转换（EPC）公司的首席执行官，参与撰写的几位作者均为从事功率半导体技术多年的专家。本书的出版获得了国际上多位专家的好评和赞赏，均认为是一部 GaN 功率晶体管的经典之作，值得推荐给从事高效功率电子技术开发的研究人员作为工作手册来参考。

本书适合从事 GaN 功率半导体技术研究的科研工作者、工程师、高年级本科生和研究生阅读，对于从事其他功率半导体技术的研究也具有借鉴意义。本书从基本的 GaN 晶体管器件物理开始介绍，包括 GaN 功率半导体器件设计、驱动电路设计，GaN 晶体管电路的版图设计、建模和测试，并且给出了使用 GaN 晶体管进行高效功率转换的应用实例，所以本书也可以作为高等院校教授此类课程的参考教材。包括 GaN 功率晶体管在内的宽禁带半导体技术是一项新兴的科学技术，国际上关于此方向的专著很少，从事宽禁带功率半导体技术的学者强烈建议国内翻译或编译出版国际上关于此方向优秀的教材和专著。

参加本书翻译工作的人员为段宝兴教授（第 1、2、4、5、10、11 章）和杨银堂教授（第 3、第 6~9 章）。另外，师通通、吴浩、马新宇、李嘉晨等同学也参加了部分文字工作，在此表示感谢。最后，由段宝兴教授对全书做了统一审校。

由于译者水平有限，加之时间紧迫，不妥或错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

段宝兴 杨银堂
西安电子科技大学

前 言

众所周知，CMOS 反相器和 DRAM 是组成数字信号处理器的两个基本单元。几十年的发展，通过利用摩尔定律提高反相器的开关速度和存储器的存储密度已经产生了难以想象的许多应用。电能的处理是基于两个功能模块：电感和电容的能量存储器，以及开关电源。为了进一步减小系统的尺寸并提高系统的性能，发展更高开关频率的新型功率器件一直是业界追求的目标。

功率 MOSFET 自从 20 世纪 70 年代中期发展以来，由于具有更高的开关速度，已经在很多应用领域代替了双极型晶体管。时至今日，功率 MOSFET 已经发展到了理论极限，所以必须借助于软开关技术才可以进一步减少器件的开关损耗。然而，因为栅极驱动损耗仍然很大，所以限制了开关频率只有几万赫兹。

最近发展起来的 GaN 功率器件大大改善了品质因数，打开了通往兆赫兹工作频率的大门。本书通过介绍 GaN 功率技术的一些设计实例和参考文献，表明 GaN 功率器件的功率密度提高了 5~10 倍。然而，我们相信 GaN 功率器件潜在的贡献不只是为了提高了效率和功率密度，它可能对我们的设计方法产生很大的影响，包括转换模式。

功率电子学是一门交叉学科。功率电子系统的基本组成包括开关、能量存储器、电路拓扑、系统封装、电磁兼容、热管理、EMC/EMI 和制造等。当开关频率比较低时，这些组件之间的耦合比较小，当前是利用分离组件的设计方法解决这些问题。当设计的系统具有更高的频率时，组件通过紧密布局以最小化可能的寄生效应，这不可避免地引入了不需要的电磁耦合和热相互作用。

组件和电路之间这种日益复杂的关系需要更加系统化的设计方法，必须同时考虑电、磁、机械和热等因素。而且，所有的组件必须同时正常工作，这些挑战促使电路设计者追求更加系统化的设计方法。对于功率电子系统，需要在功能级和子系统级都具有可行性和实用性。这些集成组件作为系统进一步集成化的基本构建模块，与数字电子系统相同，用这种方式可以使用标准化的组件实现。并且，大规模制造将使功率电子器件的成本显著降低。

GaN 技术将为今后的研究和技术创新提供发展机遇。Alex Lidow 博士在本书中提到，功率 MOSFET 花费了 30 多年的时间才达到当前的发展程度。然而 GaN 功率技术仍处于发展的初期阶段，所以需要时刻关注一些技术方面的挑战。本书比较详细地分析了以下几点问题：

- 1) 高的 dv/dt 和 di/dt 说明现在大多数商用化的栅极驱动电路不适合用于 GaN

功率器件。第3章提供了很多在栅极驱动电路设计方面的重要方法。

2) 器件封装和电路布局至关重要, 需要控制寄生效应不必要的影响, 对此, 需要软切换技术。有关封装和布局的一些重要问题在本书的第4~6章中详细介绍。

3) 高频设计也很关键, 当开关频率超过2~3MHz时, 磁性材料的选择变得有限。另外, 必须探索更具创造性的高频磁性设计方法。最近发表的论文提出了新的设计方法, 这些新的设计方法与常规方法不同, 获得了有价值的新结果。

4) 高频对EMI/EMC的影响尚待探索。

Alex Lidow 博士是功率半导体领域备受尊敬的研究者, 他一直处于新技术引领发展的前沿。他在担任国际整流器公司首席执行官的同时, 在21世纪初发起了GaN技术的研究。他还带领团队开发了第一款集成的DrMOS和DirectFET[®], 现在这些集成器件用于为新一代微处理器和许多其他应用提供电能。

本书给功率半导体工程师提供了非常有价值的资料参考, 从GaN器件物理、GaN器件特性和器件建模到器件和电路布局的考虑, 以及栅极驱动设计, 硬开关和软开关的设计考虑等方面进行了分析。此外, 本书还进一步分析了GaN技术的新应用。

本书的四位作者中有三位来自美国电力电子系统中心(CPES), 他们与Alex Lidow博士一起努力开发新一代宽带隙功率开关技术, 这种新型宽带隙功率开关技术是对传统开关技术的挑战。

李泽元博士

美国电力电子系统中心主任
弗吉尼亚理工大学杰出教授

致 谢

感谢对本书有特殊贡献的同事，包括 Jianjun (Joe) Cao、Robert Beach、Alana Nakata、Guang Yuan Zhao、Audrey Downes、Steve Colino、Bhasy Nair、Renee Yawger、Yanping Ma、Robert Strittmatter、Stephen Tsang、Peter Cheng、Larry Chen、F. C. Liu、M. K. Chiang、Winnie Wong、Chunhua Zhou、Seshadri Kolluri、Jiali Cao、Lorenzo Nourafchan 和 Andrea Miranda。

特别感谢 Joe Engle，他审阅和编辑各章节，并为本书的出版做了很多工作。另外，Joe Engle 还召集了一些图形设计人员对本书的图文设计做了耐心的工作。

对 Wiley 的编辑和工作人员表示感谢，他们对本书的出版做了认真的审查和大量工作。

最后，要感谢的是 Archie Huang 和 Sue Lin，他们的远见和支持对半导体行业的发展做出了重大贡献。

Alex Lidow

Johan Strydom

Michael de Rooij

David Reusch

宜普电源转换公司

作者简介

Alex Lidow 是宜普电源转换 (Efficient Power Conversion, EPC) 公司的首席执行官。在成立 EPC 公司之前, Lidow 博士是国际整流器 (International Rectifier, IR) 公司的首席执行官。作为 HEXFET MOSFET (六角形原胞功率 MOSFET) 的共同发明人, Lidow 博士在功率半导体技术方面拥有多项专利, 并撰写了多部功率半导体技术方面的专著。Lidow 博士于 1975 年获得加州理工学院学士学位, 并于 1977 年获得斯坦福大学博士学位。

Johan Strydom 是 EPC 公司应用副总裁。于 2001 年在兰德阿非利加大学 (现称为约翰内斯堡大学) 获得博士学位, 从 1999 年到 2002 年, 他在弗吉尼亚理工大学电力电子系统中心 (CPES) 担任博士后研究员。Strydom 博士现在在国际整流器公司和凌特公司 (Linear Technology Corporation) 担任应用工程师, 负责 DC-DC 变换器、电机驱动和 D 类音频功率放大器的研究工作。

Michael de Rooij 博士是 EPC 公司应用工程执行总监。在加入 EPC 公司之前, 曾在 Windspire 能源公司工作, 帮助开发下一代小型垂直轴风力发电机组逆变器。此外, Michael de Rooij 博士还曾担任 GE 全球研究中心的高级工程师。Michael de Rooij 博士的研究兴趣包括固态高频功率变换器、不间断电源、功率电子变换器集成技术、功率电子封装、感应加热、光电转换器、磁共振成像系统和具有保护功能的栅极驱动器等。Michael de Rooij 博士是 IEEE 的高级会员, 获得兰德阿非利加大学 (现称为约翰内斯堡大学) 博士学位。

David Reusch 是 EPC 公司的应用总监, 拥有弗吉尼亚理工大学电子工程专业学士、硕士和博士学位。在攻读博士学位期间, Reusch 博士是电力电子系统中心 (CPES) 的布拉德利研究员。Reusch 博士拥有丰富的 GaN 晶体管设计经验, 能通过设计满足功率变换器中更低损耗和更高功率密度的需求。他积极参与 IEEE 的组织工作, 并在 APEC 和 ECCE 会议上发表多篇论文。

译者简介



段宝兴

1977年生，男，陕西大荔县人，博士，教授，博士生导师。主要从事半导体功率器件及集成关键技术研究。首次在国际上提出了设计新型功率器件的衬底终端技术、电场调制技术和体电场降低等新型终端技术；提出的完全3-D RESURF终端技术可以使横向功率器件获得超低的功率损耗；提出的新型异质结功率器件将传统硅材料与宽带隙半导体材料有机结合；与合作者提出的SOI高压器件介质场增强ENDILF技术成功解决了器件纵向耐压受限问题。先后在国内外重要期刊上发表论文60余篇，其中50余篇次被SCI、EI检索，翻译出版专著2部。



杨银堂

1962年生，男，河北邯郸市人，博士，教授，博士生导师，毕业于西安电子科技大学半导体专业。曾先后担任该校微电子研究所所长、技术物理学院副院长、微电子学院院长、发展规划处处长兼“211工程”办公室主任、校长助理、副校长，兼任装备发展部军用电子元器件专家组副组长，获国家科技进步二等奖、国家自然科学基金杰出青年基金、教育部跨世纪优秀人才、全国模范教师和中国青年科技奖等荣誉，入选国家“百千万人才工程”。先后在国际、国内重要期刊上发表论文200余篇，出版专著4部。

目 录

译者序	
前言	
致谢	
作者简介	
译者简介	

第1章 GaN 技术概述 1

1.1 硅功率 MOSFET (1976 ~ 2010) ... 1
1.2 GaN 基功率器件 2
1.3 GaN 材料特性 2
1.3.1 禁带宽度 (E_g) 3
1.3.2 临界击穿电场 (E_{crit}) 3
1.3.3 导通电阻 ($R_{DS(on)}$) 4
1.3.4 二维电子气 (2DEG) 4
1.4 GaN 晶体管的基本结构 6
1.4.1 凹槽栅增强型结构 7
1.4.2 注入栅增强型结构 7
1.4.3 p 型 GaN 栅增强型结构 8
1.4.4 共源共栅混合增强型结构 8
1.4.5 GaN HEMT 晶体管反向导通 9
1.5 GaN 晶体管的制备 10
1.5.1 衬底材料的选择 10
1.5.2 异质外延技术 10
1.5.3 晶圆处理 12
1.5.4 器件与外部的电气连接 13
1.6 本章小结 15
参考文献 16

第2章 GaN 晶体管电气特性 18

2.1 引言 18

2.2 关键器件参数 18
2.2.1 击穿电压 (BV_{DSS}) 和 泄漏电流 (I_{DSS}) 18
2.2.2 导通电阻 ($R_{DS(on)}$) 22
2.2.3 阈值电压 ($V_{GS(th)}$ 或 V_{th}) ... 25
2.3 电容和电荷 27
2.4 反向传导 28
2.5 热阻 31
2.6 瞬态热阻 33
2.7 本章小结 34
参考文献 34

第3章 驱动 GaN 晶体管 36

3.1 引言 36
3.2 栅极驱动电压 38
3.3 自举和浮动电源 40
3.4 dv/dt 抗性 41
3.5 di/dt 抗性 43
3.6 接地反弹 45
3.7 共模电流 46
3.8 栅极驱动器边沿速率 47
3.9 驱动共源共栅 GaN 器件 47
3.10 本章小结 49
参考文献 49

第4章 GaN 晶体管电路布局 51

4.1 引言 51

4.2 减小寄生电感	51	6.3.1 共源电感的影响	92
4.3 常规功率环路设计	54	6.3.2 高频功率环路电感对器件 损耗的影响	93
4.4 优化功率环路	55	6.4 减少 GaN 晶体管的体二极管 传导损耗	96
4.5 并联 GaN 晶体管	56	6.5 频率对磁性的影响	99
4.5.1 单个开关中应用的 并联 GaN 晶体管	56	6.5.1 变压器	99
4.5.2 半桥应用的并联 GaN 晶体管	60	6.5.2 电感	100
4.6 本章小结	63	6.6 降压变换器实例	100
参考文献	63	6.6.1 输出电容损耗	102
第5章 GaN 晶体管的建模和 测量	64	6.6.2 栅极功耗 (P_G)	103
5.1 引言	64	6.6.3 体二极管导通 损耗 (P_{SD})	105
5.2 电气建模	64	6.6.4 开关损耗 (P_{sw})	108
5.2.1 基础建模	64	6.6.5 总动态损耗 ($P_{Dynamic}$)	109
5.2.2 基础建模的局限	66	6.6.6 导通损耗 ($P_{Conduction}$)	109
5.2.3 电路建模的局限	68	6.6.7 器件总硬开关损耗 (P_{HS})	110
5.3 热建模	69	6.6.8 电感损耗 (P_L)	110
5.3.1 提高热性能	70	6.6.9 降压变换器预估总损耗 (P_{Total})	111
5.3.2 多芯片裸片建模	72	6.6.10 考虑共源电感的降压 变换器损耗分析	111
5.3.3 复杂系统建模	74	6.6.11 降压变换器的实验结果	113
5.4 GaN 晶体管性能测量	75	6.7 本章小结	114
5.4.1 电压测量要求	76	参考文献	114
5.4.2 电流测量要求	78	第7章 谐振和软开关变换器	116
5.5 本章小结	79	7.1 引言	116
参考文献	79	7.2 谐振与软开关技术	116
第6章 硬开关拓扑	81	7.2.1 零电压和零电流开关	116
6.1 引言	81	7.2.2 谐振 DC-DC 变换器	117
6.2 硬开关损耗分析	82	7.2.3 谐振网络组合	117
6.2.1 开关损耗	83	7.2.4 谐振网络工作原理	118
6.2.2 输出电容 (C_{OSS}) 损耗	87	7.2.5 谐振开关元件	120
6.2.3 栅极电荷 (Q_G) 损耗	87	7.2.6 软开关 DC-DC 变换器	121
6.2.4 反向导通损耗 (P_{SD})	88	7.3 用于谐振和软开关应用的 关键器件参数	121
6.2.5 反向恢复 (Q_{RR}) 损耗	90	7.3.1 输出电荷 (Q_{OSS})	121
6.2.6 硬开关总损耗	90		
6.2.7 硬开关的品质因数	90		
6.3 影响硬开关损耗的外部因素	91		

7.3.2	通过制造商数据表确定 输出电荷	122
7.3.3	比较 GaN 晶体管和硅 MOSFET 的输出电荷	123
7.3.4	栅极电荷 (Q_G)	123
7.3.5	谐振和软开关应用中栅 极电荷的确定	124
7.3.6	GaN 晶体管和硅 MOSFET 的 栅极电荷的比较	125
7.3.7	GaN 晶体管和硅 MOSFET 的 性能指标的比较	125
7.4	高频谐振总线转换器实例	127
7.4.1	共振 GaN 和硅总线 转换器设计	129
7.4.2	GaN 和硅器件的比较	130
7.4.3	零电压开关转换	131
7.4.4	效率和功耗比较	132
7.5	本章小结	134
	参考文献	135

第 8 章 射频性能

8.1	引言	136
8.2	射频晶体管和开关 晶体管的区别	137
8.3	射频基础知识	139
8.4	射频晶体管指标	140
8.4.1	确定射频 FET 的高频 特性	142
8.4.2	散热考虑的脉冲测试	142
8.4.3	s 参数分析	144
8.5	使用小信号 s 参数的 放大器设计	147
8.5.1	条件稳定的双侧晶体管 放大器设计	147
8.6	放大器设计实例	148
8.6.1	匹配和偏置器网络设计	151
8.6.2	实验验证	153
8.7	本章小结	155
	参考文献	156

第 9 章 GaN 晶体管的空间 应用

9.1	引言	157
9.2	失效机理	157
9.3	辐射标准和容差	158
9.4	伽马辐射和容差	158
9.5	单粒子效应 (SEE) 测试	159
9.6	GaN 晶体管与 Rad-Hard 硅 MOSFET 的性能比较	160
9.7	本章小结	162
	参考文献	162

第 10 章 应用实例

10.1	引言	163
10.2	非隔离式 DC-DC 变换器	163
10.2.1	$12V_{IN} - 1.2V_{OUT}$ 降压 变换器	164
10.2.2	$28V_{IN} - 3.3V_{OUT}$ 点负 载模块	168
10.2.3	应用于大电流场合并联 GaN 晶 体管的 $48V_{IN} - 12V_{OUT}$ 降压变换 器	169
10.3	隔离式 DC-DC 变换器	174
10.3.1	硬开关中间总线转换器	175
10.3.2	400 V LLC 谐振变换器	184
10.4	D 类音频	185
10.4.1	总谐波失真	185
10.4.2	阻尼系数	185
10.4.3	D 类音频放大器实例	187
10.5	包络跟踪	189
10.5.1	高频 GaN 晶体管	190
10.5.2	包络跟踪实验结果	191
10.5.3	栅极驱动器的局限性	192
10.6	高共振无线能量传输	194
10.6.1	无线能量传输的 设计要素	196
10.6.2	无线能量传输实例	197

10.6.3	无线能量传输的设计	
	因素小结	203
10.7	LiDAR 与脉冲激光应用	204
10.8	功率因数校正	206
10.9	电动机驱动和光伏逆变器	208
10.10	本章小结	208
	参考文献	209

第11章 硅功率 MOSFET 替代器件 212

11.1	什么控制使用率	212
11.2	GaN 晶体管实现的新功能	212

11.3	GaN 晶体管易于使用	213
11.4	成本与时间	213
	11.4.1 原材料	214
	11.4.2 材料外延生长	214
	11.4.3 晶圆制造	214
	11.4.4 芯片测试和封装	215
11.5	GaN 晶体管的可靠性	215
11.6	GaN 晶体管的发展方向	216
11.7	本章小结	216
	参考文献	217

附录 专业术语 218

第 1 章

GaN 技术概述

1.1 硅功率 MOSFET (1976 ~ 2010)

30 多年来,随着功率金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 结构和技术的创新,电源管理的效率和成本稳步提升,在日常生活应用中,由于功率的需求,电路技术保持同步提高。然而,由于硅功率 MOSFET 渐渐达到了其理论极限,性能的改善速度已经在放缓。

功率 MOSFET 作为双极型晶体管的替代品,于 1976 年首次出现。这种多数载流子器件工作速度更快、性能更稳定,并且具有比少数载流子器件更高的电流增益^[1],这样使得开关电源转换成为商用产品。最早的功率 MOSFET 是用于早期台式计算机的 AC - DC 开关电源,然后用于变速电动机、荧光灯、DC - DC 变换器等。还包括其他成千上万的应用,这些都与我们的日常生活息息相关。

第一种功率 MOSFET 来自于国际整流器公司,为 1978 年 11 月推出的 IRF100,其中源漏击穿电压为 100V,导通电阻 $R_{DS(on)}$ 为 0.1Ω ,这个数值成为当时的最优值。因为裸片尺寸超过 40mm^2 ,价格为 34 美元,所以这种产品不可能立即取代双极型晶体管。此后,一些制造商陆续开发出多种功率 MOSFET。30 多年来,击穿电压和导通电阻的最优值每年都被设定,随后被超越。截至本书编写之日,英飞凌公司的 BSC060N10NS3 产品依然具有 100V 击穿电压的最优值。相比于国际整流器公司的 IRF100 MOSFET 的 $4\Omega \cdot \text{mm}^2$ 品质因数,英飞凌公司的 BSC060N10NS3 值为 $0.072\Omega \cdot \text{mm}^2$,这几乎达到了硅基器件的理论极限^[2]。

通过器件设计可以提高功率晶体管的许多特性。例如,超结器件和 IGBT 超越了简单垂直型多数载流子 MOSFET 理论极限的导电性能。这些创新工作在相当一段时间内仍会继续,并且肯定会采用功率 MOSFET 的低成本结构。一个具有多年工作经验的设计师,已经学会了利用这些产品不遗余力地改善功率变换电路和系统的性能。

1.2 GaN 基功率器件

氮化镓（GaN）高电子迁移率晶体管（HEMT）在2004年首次出现，是由日本Eudyna公司制造的耗尽型射频晶体管。使用碳化硅（SiC）衬底的GaN HEMT，Eudyna公司成功研制出专为射频应用的晶体管^[3]。HEMT结构于1975年由T. Mimura等人^[4]首次报道，1994年M. A. Khan等人^[5]的研究表明在AlGaIn和GaIn异质结界面处存在异常高浓度二维电子气。利用这一现象，Eudyna公司能够在千兆赫兹级的频率范围内产生基准功率增益。2005年，Nitronex公司推出了利用SIGANTIC[®]技术，生长在硅衬底上的第一款耗尽型射频GaIn HEMT器件。

射频GaIn晶体管继续在射频应用获得发展，其他公司已将产品投入市场。但是，这类器件的应用还受制于芯片的价格，而且耗尽型器件也不利于功率系统的使用（耗尽型器件需要栅极上的负电压来关断器件）。

2009年6月，宜普电源转换（EPC）公司推出了第一款增强型硅基GaIn HEMT（增强型：eGaIn[®]），这种器件专门设计用于功率MOSFET的替代品（因为eGaIn FET不需要负电压关断）。通过使用宽禁带半导体制造技术和设备，可以使得GaIn晶体管产品高产量而且低成本。此后，Matsushita、Transphorm、GaIn Systems、RFMD、Panasonic、HRL、国际整流器公司等宣布制造GaIn晶体管，而且专门针对功率转换市场。

用于功率转换的半导体器件基本要求是高效率、高可靠性、可控性和低成本。如果不具备这些特点，新的器件结构在经济上是不可行的。已经有许多新的结构和材料被认为是硅材料的继任者，有些已经取得了经济成果，有些由于技术的原因发展受到限制。下一章节将讨论为了下一代功率晶体管的发展，硅、SiC和GaIn材料之间的优缺点。

1.3 GaIn 材料特性

自20世纪50年代后期以来，硅材料一直是功率器件和电源管理系统的主要材料。相对于早期的半导体材料，如锗或硒，硅材料的优势可分为以下4个方面：

- 1) 硅材料使早期半导体材料不可能的应用成为可能；
- 2) 硅材料更可靠；
- 3) 硅材料在许多方面更容易使用；
- 4) 硅基器件的成本更低。

所有这些优点都得益于硅材料的基本物理性质，而且硅基半导体制造基础设施和工程方面的巨大投入。下面列举了硅材料与其他半导体材料一些基本属性的比

较。表 1.1 表明了三种半导体材料在功率管理市场应用方面的 5 个关键电气特性。

表 1.1 硅、碳化硅和氮化镓的材料特性

参数	单位	硅	GaN	SiC
禁带宽度 E_g	eV	1.12	3.39	3.26
临界击穿电场 E_{crit}	MV/cm	0.23	3.3	2.2
电子迁移率 μ_n	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	1400	1500	950
相对介电常数 ϵ_r		11.8	9	9.7
热导率 λ	$\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$	1.5	1.3	3.8

利用这些基本参数在器件性能方面进行比较的一种方式就是计算这三种材料各自可实现的最佳理论值。功率半导体器件可用于当今各种各样的功率变换系统中。功率半导体器件最重要的 5 个方面包括传导效率（导通电阻）、击穿电压、器件尺寸、开关效率和成本。

下一章节将具体比较表 1.1 中的前 4 个材料特性，与硅相比，SiC 和 GaN 能够制备出具有超低导通电阻、高击穿电压和较小尺寸的晶体管。第 2 章针对 GaN 晶体管，将讨论利用这种材料特性如何制备具有优越开关效率的器件；第 11 章将讨论与同等性能的硅基 MOSFET 相比，如何以更低的成本制备 GaN 晶体管。

1.3.1 禁带宽度 (E_g)

半导体的禁带宽度与晶格原子之间的化学键强度有关。更强的化学键意味着电子更难从一个位置跳跃到下一个位置。所以，较大禁带宽度的半导体材料具有较低的本征泄漏电流和较高的工作温度。表 1.1 的数据表明 GaN 和 SiC 都具有比硅大的禁带宽度。

1.3.2 临界击穿电场 (E_{crit})

更强的化学键导致更大的禁带宽度，也导致引起雪崩击穿时更高的临界击穿电场。器件的击穿电压可以近似如下：

$$V_{BR} = (1/2)w_{drift}E_{crit} \quad (1.1)$$

因此，器件的击穿电压 (V_{BR}) 与漂移区宽度 (w_{drift}) 成正比。对于同样的击穿电压，SiC 和 GaN 材料的漂移区厚度可以比硅器件小 1/10 左右。为了维持这个电场，漂移区中的载流子需要器件到达临界击穿电场时被耗尽。在器件承担耐压两端之间的电子数（假设为 N 型半导体）可以用泊松方程计算获得，如下：

$$qN_D = \epsilon_0\epsilon_r E_{crit}/w_{drift} \quad (1.2)$$

式中， q 是电子电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)； N_D 是耗尽区中的总电子数； ϵ_0 是真空介电常数 ($8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$)； ϵ_r 是材料的相对介电常数。