

Complete Guide to
Semiconductor Devices (2nd Ed.)

半导体器件完全指南

(原书第二版)

KWOK K. NG

〔美〕伍国珏 编著

李秋俊 冯世娟 译校
徐世六 李儒章



科学出版社

www.sciencep.com

Complete Guide to Semiconductor Devices(2nd Ed.)

半导体器件完全指南

(原书第二版)

〔美〕伍国珏 编著

李秋俊 冯世娟
徐世六 李儒章 译校

科学出版社

北 京

图字：01-2006-7055 号

内 容 简 介

本书全面介绍了从第一只电阻器出现至今的 200 多种半导体器件,并对每种器件的背景知识、结构、原理及应用做了完整的概述。器件类型不仅包括早期或已淘汰的器件,更包括新近的量子器件;不仅包括通用器件,还包括专用器件等。并且在附录中收录了一些最基本的器件物理知识。本书的编排可以让广大读者快速了解各类半导体器件,同时也可就某一类器件展开深入的学习与研究。本书具有如下特点:收录最全;反映最新器件研究水平;编排独特。

本书是微电子学、电子科学与技术、材料学等专业的高校师生和从业工程师等在理论学习、科学研究以及实际工作中必备的教科书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件完全指南 = Complete Guide to Semiconductor Devices / (美)伍国珏 (Ng, K. K.) 编著;李秋俊等译校. (原书第二版) —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-024699-8

I. 半… II. ① 伍… ② 李… III. 半导体器件—指南
IV. TN303-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 090776 号

责任编辑:顾英利/责任校对:邹慧卿

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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

*

2009 年 7 月第 一 版 开本: A5 (890×1240)

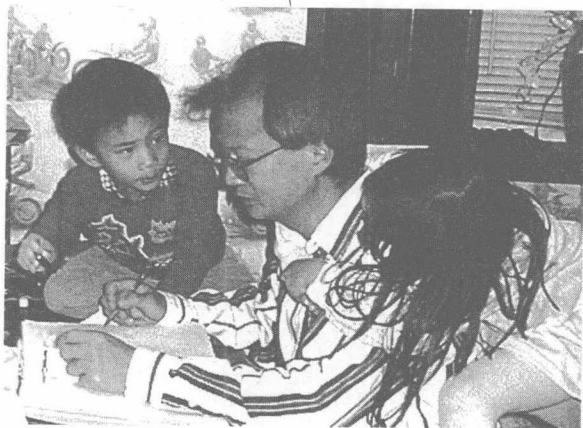
2009 年 7 月第一次印刷 印张: 23

印数: 1—2 500 字数: 900 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

献给我的家人——
Linda,
Vivian, Valerie, Kyle



“全神贯注，心无旁骛”

作者在家中工作，两侧是儿子 Kyle 和女儿 Valerie。

此照片由女儿 Vivian 拍摄

再版前言

本书第一版问世八年之后，新版赋予了我进一步实现全面搜集半导体器件愿望的良机。借此机会，增加了八个章节的内容。在这些新增加的器件中，有一些是在第一版出版后发明的，有一些是在第一版出版之前不久才发明因而公布受到限制，还有一些则纯粹是被遗漏。此外新版还增加了一种有意义的器件，即单电子晶体管，由于它可以由金属和绝缘体制作，不一定是半导体器件，所以将它增补在附录 A 中。前一版中论述欧姆接触的一章被移到附录 B 中，因为它更像是一个组件而不是一个器件。新版对目录中器件的分类也稍做调整，原有各章在认为有必要时都做了适当的补充修订。

附录 B 新增了一节关于扩散的内容。这样，附录 B 便涵盖了半导体器件的所有导电机理，这与许多教科书中开头几章的情况相类似。若本书被用作研讨课程的主要读本，可以在学习选定的章节之前仔细阅读附录 B 中的内容。仍然希望本书能为研究半导体器件提供新的设计制造思路，并且也能成为与半导体相关课程的有益参考书籍。

如果没有资源丰富的图书馆的强有力支持，这种内容全面的书籍是不可能出版的，在此我要对杰尔(Agere)系统图书馆和朗讯(Lucent)科技图书馆表示真诚谢意(杰尔系统公司最近刚从朗讯科技公司分拆出来，朗讯科技公司保留了贝尔实验室)。我还要真心感谢一直同我交流并给我鼓励的施敏(S. M. Sze)，感谢给我提供经费支持的经纪人：J. D. Bude、D. J. Eaglesham 和 T. L. Koch。我还要感激以下给予我帮助的人：对我的文稿进行精心编辑排版的 N. Erdos 和 B. Zeiders，威立父子出版公司编辑 G. J. Telecki，杰尔图书馆的管理员 A. C. Harvey 以及杰尔公司的律师 R. J. Botos。真诚感谢以下评审人花费大量宝贵时间对本书新章节进行评注，他们是：T. Baba、K. Hess、K. K. Likharev、J. C. Lodder、M. G. Stapelbroek、E. Towe、R. Tsu 和 W. I. Wang。最后，我更要感谢我家人——我的夫人 Linda 及我的孩子 Vivian、Valerie 及 Kyle 的充分理解和大力支持，没有这一切本书无法顺利完成。

伍国珏

前 言

过去 50 年间全球电子工业令人惊讶的高速发展归功于半导体器件,即集成电路的基本组成单元。由于信息时代对更快速和更复杂系统的持续需求,因此不仅已有的半导体器件得到改进、完善,新的器件也在不断涌现。在这个引人入胜的领域,无论在高速度、低功耗、高集成度、高效率方面,还是在新功能方面,半导体器件的数目和类型都在稳步增长。虽然不乏详细介绍每种器件的文章和书籍,但还没有一本囊括各类半导体器件的书籍,包括从早期的往往已是被淘汰不用的器件到新发明的量子器件,以及从通用到专用的晶闸管和传感器等。本指南旨在全面收集半导体器件,并对每种器件做简要评述。

由于这种独特的形式,本书广泛适用于与电子工业直接或间接相关的广大读者。在高等院校中,本书是与半导体器件物理、超大规模集成电路工艺、材料科学或物理学相关课程的有益补充读物。本书能够引领大学生和研究生纵览半导体器件,也能够使他们对现有各种器件有更深入的了解。本书还可作为主要教材用于研究生研讨课程,期望课程中的充分讨论能弥补本书在问题设置上的不足。对于从事实际工作的工程师来说,本书可用作迅速了解其专业领域之外器件的实用指南。

一本具有上述特点的书籍必定会引起异议,而无论异议是源于遗漏了某些器件,还是源于忽视了器件的某些历史进程。作者欢迎并感谢那些使未来版本不断完善的建议。

首先,我要对 S. M. Sze、J. R. Brews、T. C. Y. Poon 和 S. J. Hillenius 的亲自关照和鼓励以及在本书编写过程中给予的帮助表示感谢。也十分感谢过去和现在为我提供支持和良好环境的经纪人——W. T. Lynch、R. Liu 和 J. T. Clemens。在我使用一款商业桌面出版软件向出版公司提交文稿快照时,T. D. Stanik、C. J. Case 和 W. S. Lindenberger 所提供的计算机方面的协助对我很有帮助。

我还要感谢美国电话电报公司(AT&T)图书馆,没有它们,本书便无法完成。感谢完成了所有文献查找工作的 W. F. Wright。感谢对全部文稿进行编辑并做出重要修改的贝尔实验室的编辑 N. Erdos。我在与麦格劳-希尔出版社的编辑 A. T. Brown 和 G. T. Hoffman 的愉快交流中同样获益匪浅,在此表示感谢!我还对出版社和文献作

者同意重新绘制已发表的图表表示感谢。

我非常感谢许多评审人花费时间从专业角度对所选取的章节进行评论,并提出大量宝贵的改正意见和建议。他们是: D. A. Antoniadis、P. Bhattacharya、A. Blicher、G. Bosman、C. O. Bozler、J. C. Campbell、F. Capasso、小 H. C. Casey、R. Castagnetti、C. Y. Chang、T. H. Chiu、T. Y. Chiu、S. Y. Chou、T. P. Chow、N. F. de Rooij、K. Dezaki、P. W. Diodato、L. F. Eastaman、J. S. Escher、E. R. Fossum、H. M. Gibbs、M. A. Green、A. Grinberg、H. K. Gummel、G. I. Haddad、M. M. Hashemi、M. Heiblum、K. Hess、M. A. Hollis、C. Hu、A. Kastalsky、R. A. Kiehl、W. F. Kosonocky、S. K. Lai、B. F. Levine、S. S. Li、S. Luryi、T. P. Ma、R. J. Malik、G. C. M. Meijer、S. Middelhoek、T. Misawa、H. Morkoc、S. R. Morrison、P. N. Panayotatos、P. Plotka、E. Rosencher、R. H. Saul、A. C. Seabaugh、S. D. Senturia、M. P. Shaw、M. Shoji、M. Shur、B. G. Streetman、T. Sukegawa、G. W. Taylor、B. Y. Tsaui、R. Tung、H. T. Weston、J. F. White、R. M. White、T. H. Wood 和 C. H. Yang。

我要借此机会向我在拉特格斯(Rutgers)大学期间的本科指导教师 W. A. Anderson, 以及在哥伦比亚(Columbia)大学期间的研究生指导教师 H. C. Card 表示感谢, 是他们带领我进入我所乐于从事的器件领域。最后, 我还要感谢我的家人——我的妻子 Linda 及我的女儿 Vivian 和 Valerie, 在这四年半繁忙期间所给予的充分理解和支持。

伍国珏

目 录

再版前言

前言

引言 1

二极管 I: 整流器

第 1 章 p-n 结二极管	10
1.1 历史	10
1.2 结构	10
1.3 特性	11
1.4 应用	18
1.5 相关器件	18
1.5.1 齐纳二极管	18
1.5.2 阶跃恢复二极管	18
1.5.3 异型异质结	19
1.5.4 变容二极管	20
第 2 章 p-i-n 二极管	22
第 3 章 肖特基势垒二极管	29
3.5.1 莫特势垒	38
3.5.2 金属-绝缘体-半导体隧道二极管	38
第 4 章 平面掺杂势垒二极管	40
4.5.1 双峰式二极管	44
4.5.2 平面掺杂势垒场效应晶体管	45
第 5 章 同型异质结	47

注: 由于(1)历史、(2)结构、(3)特性和(4)应用在每一章中都出现, 所以除第一章作为例子以外, 它们在目录中均被省去。

5.5.1 缓变结构势垒	52
--------------	----

二极管 II: 负阻 N 形

第 6 章 隧道二极管	55
6.5.1 反向二极管	60
第 7 章 转移电子器件	62
第 8 章 共振隧穿二极管	72
8.5.1 共振隧穿场效应晶体管	77
第 9 章 共振带间隧穿二极管	80
第 10 章 单势垒隧道二极管	86
第 11 章 单势垒带间隧穿二极管	90
第 12 章 实空间转移二极管	93

二极管 III: 负阻效应 S 形

第 13 章 金属-绝缘体-半导体开关	97
13.5.1 金属-绝缘体-半导体-金属开关	102
13.5.2 金属-绝缘体-半导体-绝缘体-金属开关	102
第 14 章 平面掺杂势垒开关	105
14.5.1 多晶硅-n-p 开关	109
14.5.2 双异质结构光电子开关	110
第 15 章 无定形半导体阈值开关	112
15.5.1 无定形半导体存储开关	114
第 16 章 异质结构热电子二极管	117

二极管 IV: 负阻 渡越时间

第 17 章 碰撞电离雪崩渡越时间二极管	121
17.5.1 俘获等离子体雪崩触发渡越二极管	127
17.5.2 双速雪崩渡越时间二极管	128
17.5.3 混合隧道雪崩渡越时间二极管	129
第 18 章 势垒注入渡越时间二极管	130

18.5.1	双速渡越时间二极管	135
18.5.2	隧道注入渡越时间二极管	135
18.5.3	量子阱注入渡越时间二极管	136

电阻和电容器件

第 19 章	电阻器	138
19.5.1	变阻器	142
19.5.2	电势计	143
19.5.3	n-i-n 二极管	144
第 20 章	金属-氧化物-半导体电容器	146
20.5.1	金属-绝缘体-半导体电容器	153
20.5.2	平板电容器	153
第 21 章	电荷耦合器件	157
21.5.1	埋沟电荷耦合器件	164
21.5.2	蠕动电荷耦合器件	165
21.5.3	成型蠕动式电荷耦合器件	165
21.5.4	庠链器件	165

晶体管 I: 场效应

第 22 章	金属-氧化物-半导体场效应晶体管	167
22.5.1	双扩散金属-氧化物-半导体晶体管	178
22.5.2	横向扩散金属-氧化物-半导体晶体管	178
22.5.3	六角形场效应晶体管	178
22.5.4	V 形槽(或纵向)金属-氧化物-半导体晶体管	178
22.5.5	U 形槽金属-氧化物-半导体晶体管	180
22.5.6	薄膜晶体管	180
22.5.7	金属-绝缘体-半导体场效应晶体管	181
22.5.8	压敏场效应晶体管	181
第 23 章	结型场效应晶体管	183
23.5.1	V 形槽场效应晶体管	190
第 24 章	金属-半导体场效应晶体管	192
第 25 章	调制掺杂场效应晶体管	201

25.5.1	倒置异质结场效应晶体管	206
25.5.2	平面掺杂异质结场效应晶体管	207
25.5.3	单量子阱异质结场效应晶体管	207
25.5.4	超晶格异质结场效应晶体管	207
25.5.5	赝异质结场效应晶体管	207
25.5.6	异质结绝缘栅场效应晶体管	207
25.5.7	半导体-绝缘体-半导体场效应晶体管	209
25.5.8	掺杂沟道异质结场效应晶体管	209
第 26 章	可渗基区晶体管	210
第 27 章	静电感应晶体管	215
第 28 章	实空间转移晶体管	224
第 29 章	平面掺杂场效应晶体管	232
第 30 章	表面隧道晶体管	237
30.5.1	肖特基隧道晶体管	241
第 31 章	横向共振隧穿场效应晶体管	243
第 32 章	斯塔克效应晶体管	247
第 33 章	速度调制晶体管	251

晶体管 II: 电势效应

第 34 章	双极型晶体管	256
34.5.1	异质结双极型晶体管	268
34.5.2	达林顿放大器	270
34.5.3	隧穿发射极双极型晶体管	270
第 35 章	隧穿热电子转移放大器	272
第 36 章	金属基极晶体管	279
第 37 章	双极反型沟道场效应晶体管	284
37.5.1	体势垒晶体管	288
第 38 章	隧道发射极晶体管	292
38.5.1	表面氧化物晶体管	296
第 39 章	平面掺杂势垒晶体管	299
39.5.1	双峰式晶体管	302
第 40 章	异质结热电子晶体管	304

第 41 章 感应基区晶体管	308
第 42 章 共振隧穿双极晶体管	313
第 43 章 共振隧穿热电子晶体管	319
第 44 章 量子阱基区共振隧穿晶体管	324
第 45 章 自旋阀晶体管	329

非易失性存储器

第 46 章 浮栅雪崩注入金属-氧化物-半导体晶体管	335
46.5.1 浮栅隧道氧化物晶体管	339
第 47 章 金属-氮化物-氧化物-半导体晶体管	341
47.5.1 金属-氧化物-氮化物-氧化物-半导体晶体管	345
47.5.2 铁电场效应晶体管	346

晶闸管和功率器件

第 48 章 可控硅整流器	348
48.5.1 门极辅助关断晶闸管	356
48.5.2 门极关断晶闸管	356
48.5.3 非对称晶闸管	356
48.5.4 反向导通晶闸管	357
48.5.5 转折二极管	357
48.5.6 二极管交流开关	358
48.5.7 三极管交流开关	359
48.5.8 光敏晶闸管	359
48.5.9 可编程单结晶体管	360
48.5.10 可控硅开关	361
48.5.11 硅单向开关	361
48.5.12 硅双向开关	362
48.5.13 MOS 控制晶闸管	362
第 49 章 绝缘栅双极型晶体管	364
第 50 章 静电感应晶闸管	370
第 51 章 单结晶体管	376

光电子器件 I: 光源

第 52 章 发光二极管	381
52.5.1 超发光二极管	388
52.5.2 量子阱发光二极管	389
52.5.3 超晶格发光二极管	389
52.5.4 共振隧穿发光二极管	389
52.5.5 量子点发光二极管	390
第 53 章 注入式激光器	392
53.5.1 异质结激光器	398
53.5.2 大光腔激光器	399
53.5.3 分别限制异质结激光器	400
53.5.4 量子阱激光器	400
53.5.5 超晶格激光器	400
53.5.6 解理耦合腔激光器	400
53.5.7 分布反馈激光器	401
53.5.8 垂直腔面发射激光器	402
53.5.9 量子级联激光器	402
53.5.10 量子点激光器	403
53.5.11 半导体光放大器	403

光电子器件 II: 光电探测器

第 54 章 光电导元件	406
54.5.1 光电磁探测器	410
54.5.2 自由载流子光电导元件	411
54.5.3 普特来探测器	411
54.5.4 丹倍效应探测器	411
第 55 章 p-i-n 光电二极管	413
55.5.1 p-n 结光电二极管	416
55.5.2 核辐射探测器	418
第 56 章 肖特基势垒光电二极管	419
56.5.1 异质结内光电发射探测器	423

第 57 章 电荷耦合图像传感器	426
57.5.1 电荷注入器件	431
第 58 章 雪崩光电二极管	434
58.5.1 吸收区、倍增区分置雪崩光电二极管	438
58.5.2 超晶格雪崩光电二极管	439
58.5.3 台阶雪崩光电二极管	439
第 59 章 光电晶体管	442
59.5.1 达林顿光电晶体管	445
59.5.2 雪崩光电晶体管	445
59.5.3 光敏场效应晶体管	445
59.5.4 体势垒光电晶体管	446
59.5.5 静电感应光电晶体管	447
59.5.6 隧道发射极光电晶体管	448
第 60 章 金属-半导体-金属光电探测器	450
第 61 章 量子阱红外光电探测器	455
第 62 章 量子点红外光电探测器	461
第 63 章 阻挡杂质带光电探测器	465
第 64 章 负电子亲和势光电阴极	470
64.5.1 光电倍增管	474
64.5.2 转移电子光电阴极	476
第 65 章 光子牵引探测器	478

光电子器件 III: 双稳态光学器件

第 66 章 自电光效应器件	481
第 67 章 双稳态标准具	485
67.5.1 干扰滤波器	488

光电子器件 IV: 其他器件

第 68 章 太阳能电池	490
第 69 章 电吸收调制器	498
69.5.1 光波导	501

69.5.2	电光调制器	501
69.5.3	马赫-岑德尔调制器	502
69.5.4	定向耦合器调制器	502

传感器

第 70 章	热敏电阻器	504
70.5.1	电阻测温计	507
70.5.2	热敏电阻辐射热测量计	507
70.5.3	热电探测器	508
第 71 章	霍尔器件	511
71.5.1	磁敏电阻器	513
71.5.2	磁敏二极管	514
71.5.3	磁敏晶体管	515
71.5.4	磁场敏感型场效应晶体管	516
71.5.5	载流子畴磁场传感器	516
71.5.6	磁致伸缩传感器	517
第 72 章	应变计	518
72.5.1	压电应变计	523
第 73 章	叉指换能器	525
第 74 章	离子敏感场效应晶体管	530
74.5.1	酶场效应晶体管	533
74.5.2	离子控制二极管	533
74.5.3	半导体氧化物传感器	534
74.5.4	催化金属传感器	534
74.5.5	裸栅场效应晶体管	535
74.5.6	吸附式场效应晶体管	535
74.5.7	电荷流晶体管	535
附录 A	精选的非半导体器件	537
A1	真空管	538
A2	超导器件	541
A3	电感器和变压器	547
A4	液晶显示器	550

A5 热电偶和热电堆	553
A6 金属-绝缘体-金属二极管	556
A7 单电子晶体管	558
附录 B 物理现象	567
B1 漂移速度和迁移率	568
B2 扩散	572
B3 热电子发射	577
B4 镜像力降低	580
B5 复合和产生	583
B6 碰撞电离和雪崩	590
B7 空间电荷效应和空间电荷限制电流	594
B8 隧穿	596
B9 欧姆接触	599
B10 霍尔效应	607
B11 异质结、量子阱、超晶格和量子点	613
附录 C 各类器件的一般应用	619
C1 整流器的应用	620
C2 负微分电阻的应用	626
C3 晶体管的应用	628
C4 光电探测器的应用	631
C5 双稳态光学器件的应用	633
C6 半导体存储器	636
附录 D 物理性质	641
D1 半导体的性质	642
D2 Ge、Si 和 GaAs 的性质	644
D3 SiO_2 和 Si_3N_4 的性质	646
D4 电阻率和迁移率	647
D5 本征浓度和费米能级	650
D6 耗尽列线图解	653
D7 吸收系数	654
D8 硅氧化速率	655

D9	离子注入范围和标准偏差	657
D10	杂质扩散系数	661
D11	杂质能级	663
D12	固溶度	665
D13	金属和硅化物的性质	667
D14	能隙与晶格常数的关系	670
附录 E	基本信息	671
E1	常用公式	672
E2	缩略语	675
E3	电磁波谱	682
E4	元素周期表	683
E5	元素符号	685
E6	国际单位制(SI)	686
E7	单位前缀	687
E8	希腊字母	688
E9	基本物理常数	689
E10	符号表	690
索引		703
译后记		715