

TURING

图灵电子与电气工程丛书

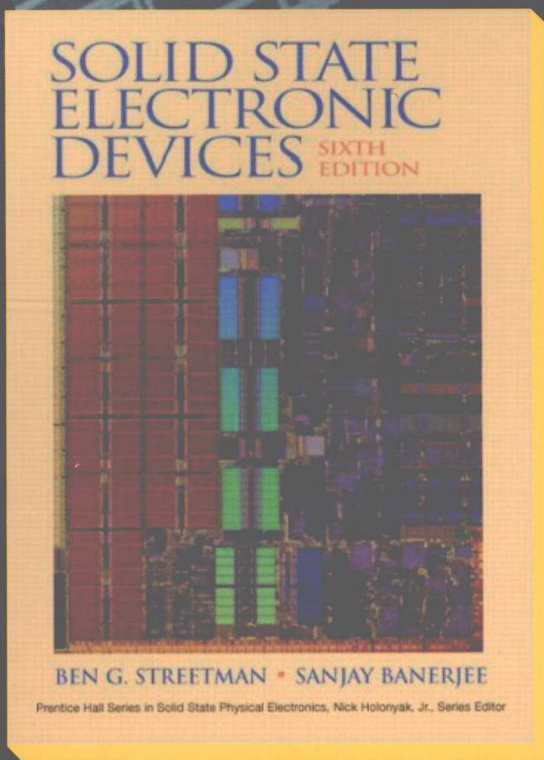
PEARSON

(第6版)

固态电子器件

Solid State Electronic Devices
Sixth Edition

[美] Ben G. Streetman 著
Sanjay Kumar Banerjee
何小威 陈 虎 等译
刘 征 张 鼎



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

图灵电子与电气工程丛书

(第6版)

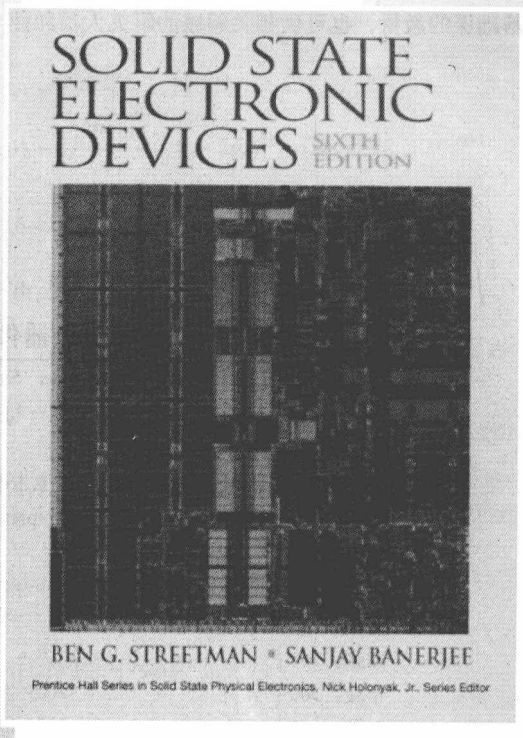
固态电子器件

Solid State Electronic Devices

Sixth Edition

[美] Ben G. Streetman 著
Sanjay Kumar Banerjee

何小威 陈虎 等译
刘征 张鼎



人民邮电出版社
北京

人民邮电出版社

样书

专用章

图书在版编目 (CIP) 数据

固态电子器件：第6版 / (美) 斯特里特曼 (Streetman, B. G.), (美) 巴纳里杰 (Banerjee, S. K.) 著; 何小威等译. —北京: 人民邮电出版社, 2009.10 (图灵电子与电气工程丛书)

书名原文: Solid State Electronic Devices: Sixth Edition

ISBN 978-7-115-20216-1

I. 固… II. ①斯… ②巴… ③何… III. 半导体器件—教材 IV. TN303

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第149523号

内 容 提 要

本书是介绍半导体器件工作原理的经典入门教材, 其主要内容包括固体物理基础和半导体器件物理两大部分, 同时也涵盖半导体晶体结构与材料生长技术、集成电路原理与制造工艺以及光电子器件与高频大功率器件等相关内容。

本书注重基本物理概念, 强调理论联系实际, 可作为高等院校电子信息类专业“固态器件与电路”专业基础课的教材, 也可供相关领域的研究人员和技术人员参考。

图灵电子与电气工程丛书 固态电子器件 (第6版)

-
- ◆ 著 [美] Ben G. Streetman Sanjay Kumar Banerjee
译 何小威 陈 虎 刘 征 张 鼎 等
责任编辑 朱 巍
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市潮河印业有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 26
字数: 700千字 2009年10月第1版
印数: 1-3 000册 2009年10月河北第1次印刷
著作权合同登记号 图字: 01-2006-3663号
ISBN 978-7-115-20216-1
-

定价: 75.00元

读者服务热线: (010) 51095186 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

版权声明

Authorized translation from the English language edition, entitled: *Solid State Electronic Devices, Sixth Edition*, 013149726X by Ben G. Streetman and Sanjay Kumar Banerjee, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2005, 2000, 1995, 1990, 1980, 1972 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD. and POSTS & TELECOM PRESS. Copyright © 2009.

本书中文简体字版由Pearson Education Asia Ltd.授权人民邮电出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封面贴有Pearson Education（培生教育出版集团）激光防伪标签，无标签者不得销售。版权所有，侵权必究。

译者序

1958年，德州仪器公司（TI）的Jack Kilby发明了世界上第一块集成电路，为整个现代微电子技术领域打下了基础，此后，集成电路技术飞速发展，使得计算机、通信等信息技术都发生了革命性的变化。在集成电路领域中，固态电子器件是最活跃、发展最迅速的方向之一。

本书作者Ben G. Streetman和Sanjay Kumar Banerjee均是国际知名教授，长期从事集成电路和电子器件方面的教学工作，有着渊博的理论和丰富的教学实践经验。该书从第1版问世以来就好评如潮，被公认为是固态电子器件方面的权威、经典著作。后续的各版本又及时地吸收固态电子器件的最新进展，作者不断采纳广大师生提出的宝贵建议，陆续对书的内容进行了调整。本书是第6版，不仅继承了前5版的优点，而且内容更加精炼，组织更加合理，更加突出了本科基础教学的鲜明特色。全书内容广泛系统，结构合理，论述上循序渐进、深入浅出，语言简明扼要、生动而不失严谨。

本书重点在于介绍固态电子器件的基本概念、基本原理以及各种常用器件。作者在着重阐述基本概念、基本原理的同时，力求不涉及过多的数学推导，一些重要的推导以附录的形式给出，一些重要的公式按照内容顺序列于书后以方便读者查阅。同时，该书在每章之后还附有精选习题，每道习题都具有很强的针对性，以帮助学生理解、吸收本章的新概念、新原理，使学生可以及时巩固所学知识。

本书主要由何小威、陈虎、刘征和张鼎翻译。此外，参与翻译的人还有：闫志强、邓彬、林龙信、李晋文、肖枫涛、张聪、韩智文、马蓉、焦贤龙、邝祝芳、奚丹、刘志忠、陈钢、宋锐、石志广、唐玲艳、唐扬斌、叶俊、杨明军、肖国尊、张乐锋等。全书由陈虎统一审校。Be Flying工作室（<http://blog.csdn.net/be-flying>）负责人肖国尊对本书的翻译和出版做了大量的协调和规范工作，特别是在翻译进度和质量的把关方面，在此予以衷心感谢。

前 言

本书是关于半导体器件的导论性读本，适合作为电子工程专业的本科生教材和对固态电子器件感兴趣的学生的参考书，也可作为工程技术人员和科技工作者更新其现代电子学知识的参考读本。本书在内容安排上力求使具有大学二年级物理知识的学生进一步深化其专业知识，最终能够阅读并理解当前大多数论述新型器件及其应用方面的专业文献。

目标

为本科生开设的电子器件方面的课程有两个基本目的：（1）让学生对现有的器件有透彻的理解，使他们能够更好地学习和理解后续的电子线路和电子系统课程；（2）引导和帮助学生掌握分析器件的基本方法，使他们以后能够将其应用于各种新型器件的研发与应用。从长远来看，第二个目的具有更重要的意义，因为从事电子学领域的工程师和科学家在其工作中需要不断地学习和掌握将来的新器件和新工艺。基于这样的考虑，我们尝试把半导体材料和固体导电机理两方面的基本知识融合到一起，这种做法也反复出现在介绍新型器件的文献中。这些知识在一些概论性课程中常常被省略了，因为一般认为并不需要理解结和晶体管的基本原理。但我们认为，培养学生的一个重要目的就是要让学生能够通过阅读最新的专业文献来理解新器件，而上述观点却忽视了这一点。因此，本书介绍了大多数常用的半导体术语和概念，它们和很多电子器件都有紧密的联系。

参考读物

为培养学生自学新技术的能力，每章的后面都附了一些可供学生自由选读的参考文献。我们并不期望学生能够读遍所推荐的所有文章，但尽可能多地阅读一些相关的文献会有助于学生的知识更新，并为自我继续教育打下良好基础。同时，我们在每一章的末尾归纳总结了本章的重要概念。

习题

学好本书的关键之一是多做课后的习题，以便加深理解并透彻掌握基本概念。每章的后面都有一定量的习题，其中一小部分是很简单的“附加”题，用以扩展或深化每章的内容。而且，我们还设置了“自我测验”题目，用以检测学生对基本概念的理解。

单位

为达到上述目标，本书中的例题和习题所采用的单位都是半导体文献中常用的。一般情况下均采用MKS单位制，但有时采用厘米作为长度单位更方便。类似地，本书中的能量单位

更多地采用电子伏特 (eV) 而不是焦耳 (J)。附录A和附录B分别列出了各种物理量的单位。

内容安排

在给本科生讲授这门课程时,有时可能会使用“可以证明……”这样的短语来直接引出某些更高级或者更复杂的结论,但恐怕难免会令某些读者失望。另一种变通的方法就是,可以根据需要把课程的某些内容延后,留待研究生阶段再学习。因为那时候就可以把统计力学、量子理论以及其他高级知识轻易地穿插进来。虽然这样做可以使课程讲授起来容易一些,但同时也使本科学生失去了探索某些新型器件问题的乐趣。

本书的内容包括硅和化合物半导体器件,以反映化合物半导体在光电子和高速器件应用方面日益增长的重要性。除此之外,我们还增加了异质结、三元和四元合金的晶格匹配、带隙随合金组分的变化,以及量子阱的特性等内容。但是,在讲授时不能过分强调化合物半导体的应用,硅基器件同样有显著的进展,这些进展在讨论场效应晶体管结构和硅基集成电路时得到了具体体现。我们不可能介绍所有最新的器件,这些内容只能借助专业刊物和会议论文阐述。本书只对那些能够最大限度地说明重要基本原理的器件加以介绍。

本书的前4章阐述半导体性质和固体的导电过程相关的背景知识,其中第2章对量子概念做了简单介绍,这是为那些尚不具备这方面基础知识的学生准备的。第5章阐述了半导体PN结及其某些应用。第6章和第7章则是关于晶体管的工作原理。第8章介绍了光电子学方面的相关知识。第9章讨论了集成电路。第10章则把PN结的理论和导电理论应用到微波和大功率器件中去。书中介绍的所有器件在当今电子学中都很重要。学习这些器件将是充满乐趣、富有收获的,我们希望本书能让读者有这样一种体验。

致谢

使用过本书第5版的教师和学生提出的意见和建议使第6版受益非浅。本书的很多读者也为我们进一步完善目前这个版本而慷慨地提出了许多建设性意见。我们向前5版序言中提到的那些人深表感谢,他们对本书的贡献巨大。特别是Nick Holonyak,他在6个版本的完成和出版过程中一直是我们的精神动力和信息源泉。我们还要感谢得克萨斯大学奥斯汀分校的同事们给我们提供的特别帮助,特别是Joe Campbell、Leonard Frank Register、Ray Chen、Archie Holmes、Dim-Lee Kwong、Jack Lee和Dean Neikirk。Lisa Weltzer协助录入了课后习题答案。谨向那些慷慨地为本书提供器件和工艺照片以及插图的公司和机构表示感谢。其中特别要说明的是,Freescale公司的Bill Dunnigan、Naras Iyengar和Pradipto Mukherjee, TI公司的Peter Rickert和Puneet Kohli, Micron公司的Chandra Mouli和Dan Spangler, Applied Materials公司的Majeed Foad,以及MEMC的Tim Sater为我们提供了这一版教材中的许多新照片。最后,我们想说,我们珍视并感谢已故的Al Tasch与我们多年的交往与合作,他既是我们的好同事,又是一位难得的朋友。

目 录

第1章 晶体性质和半导体生长.....1	自我测验.....39
1.1 半导体材料.....1	第3章 半导体能带和载流子.....41
1.2 晶格.....2	3.1 固体的结合力和能带.....41
1.2.1 周期结构.....2	3.1.1 固体的结合力.....41
1.2.2 立方晶格.....4	3.1.2 能带.....42
1.2.3 晶面与晶向.....5	3.1.3 金属、半导体和绝缘体.....44
1.2.4 金刚石晶格.....7	3.1.4 直接禁带半导体和间接禁带 半导体.....45
1.3 块状晶体生长.....9	3.1.5 能带结构随合金组分的变化.....47
1.3.1 制备原材料.....9	3.2 半导体中的载流子.....48
1.3.2 单晶的生长.....9	3.2.1 电子和空穴.....48
1.3.3 圆片.....10	3.2.2 有效质量.....50
1.3.4 掺杂.....11	3.2.3 本征材料.....53
1.4 外延生长.....12	3.2.4 非本征材料.....54
1.4.1 外延生长的晶格匹配.....12	3.2.5 量子阱中的电子和空穴.....56
1.4.2 汽相外延.....14	3.3 载流子浓度.....57
1.4.3 分子束外延.....15	3.3.1 费米能级.....57
小结.....17	3.3.2 平衡态下电子和空穴的浓度.....59
习题.....17	3.3.3 载流子浓度对温度的依赖关系.....63
参考读物.....18	3.3.4 杂质补偿和空间电荷的中性.....64
自我测验.....18	3.4 载流子在电场和磁场中的运动.....65
第2章 原子和电子.....21	3.4.1 电导率和迁移率.....66
2.1 物理模型介绍.....21	3.4.2 漂移和电阻.....68
2.2 重要实验.....22	3.4.3 温度和掺杂对迁移率的影响.....69
2.2.1 光电效应.....22	3.4.4 高电场效应.....70
2.2.2 原子光谱.....23	3.4.5 霍尔效应.....72
2.3 玻尔模型.....24	3.5 平衡态费米能级的不变性.....73
2.4 量子力学.....26	小结.....74
2.4.1 几率和不确定性原理.....26	习题.....75
2.4.2 薛定谔波动方程.....27	参考读物.....76
2.4.3 势阱问题.....29	自我测验.....77
2.4.4 隧穿.....30	第4章 半导体中的过剩载流子.....79
2.5 原子结构和元素周期表.....31	4.1 光吸收.....79
2.5.1 氢原子.....32	4.2 发光机理.....81
2.5.2 元素周期表.....33	4.2.1 光致发光.....81
小结.....37	4.2.2 电致发光.....83
习题.....37	4.3 载流子寿命和光导电性.....83
参考读物.....38	

4.3.1 电子和空穴的直接复合	84
4.3.2 间接复合与陷阱	85
4.3.3 稳态载流子产生; 准费米能级	87
4.3.4 光导器件	89
4.4 载流子的扩散	90
4.4.1 扩散过程	90
4.4.2 载流子的扩散和漂移, 内建电场	92
4.4.3 扩散和复合, 连续性方程	94
4.4.4 稳态载流子注入和扩散长度	95
4.4.5 海恩斯-肖克莱实验	97
4.4.6 准费米能级的梯度	99
小结	100
习题	101
参考读物	102
自我测验	102
第5章 PN结	104
5.1 PN结的制造	104
5.1.1 热氧化	104
5.1.2 扩散	105
5.1.3 快速热处理	106
5.1.4 离子注入	107
5.1.5 化学气相淀积	108
5.1.6 光刻	109
5.1.7 刻蚀	112
5.1.8 金属化	113
5.2 平衡态的PN结	114
5.2.1 接触电势	115
5.2.2 平衡态时的费米能级	118
5.2.3 结的空间电荷	118
5.3 正偏结、反偏结和稳态条件	121
5.3.1 结电流的定性分析	122
5.3.2 载流子的注入	124
5.3.3 反向偏置	130
5.4 反向击穿	132
5.4.1 齐纳击穿	133
5.4.2 雪崩击穿	134
5.4.3 整流器	135
5.4.4 击穿二极管	138
5.5 瞬态特性和交流特性	138
5.5.1 存储电荷的瞬态变化	139
5.5.2 反向恢复过程	141
5.5.3 开关二极管	143
5.5.4 PN结电容	143
5.5.5 变容二极管	147
5.6 简单理论的修正	147

5.6.1 接触电势对载流子注入的影响	148
5.6.2 耗尽层中载流子的复合和产生	149
5.6.3 欧姆损耗	151
5.6.4 缓变结	152
5.7 金属半导体结	153
5.7.1 肖特基势垒	154
5.7.2 整流接触	155
5.7.3 欧姆接触	156
5.7.4 典型的肖特基势垒	157
5.8 异质结	158
小结	162
习题	163
参考读物	166
自我测验	166
第6章 场效应晶体管	169
6.1 晶体管的工作原理	170
6.1.1 负载线	170
6.1.2 放大和开关	171
6.2 结型场效应晶体管	171
6.2.1 夹断与饱和	172
6.2.2 栅极的控制	173
6.2.3 电流-电压特性	175
6.3 金属半导体型场效应晶体管	176
6.3.1 GaAs型MESFET	176
6.3.2 高电子迁移率型晶体管	177
6.3.3 短沟道效应	178
6.4 金属绝缘半导体型场效应晶体管	179
6.4.1 基本原理和构造	179
6.4.2 理想MOS电容	182
6.4.3 实际的表面效应	190
6.4.4 阈值电压	192
6.4.5 MOS管的电容-电压特性分析	194
6.4.6 时变电容的测量	196
6.4.7 MOS管栅氧的电流-电压特性	197
6.5 MOS场效应晶体管	199
6.5.1 输出特性	200
6.5.2 传输特性	201
6.5.3 迁移率模型	204
6.5.4 短沟道MOSFET的伏安特性	205
6.5.5 阈值电压的控制	206
6.5.6 衬底偏置效应	210
6.5.7 亚阈值特性	211
6.5.8 MOSFET等效电路	212
6.5.9 MOSFET的尺寸缩放及热电子效应	214

6.5.10 漏极感应势垒降低	217	8.1.2 光单元	275
6.5.11 短沟道效应和窄宽度效应	219	8.1.3 光检测器	277
6.5.12 栅极感应的漏极漏电流	220	8.1.4 光检测器的增益、带宽和信噪比	279
小结	221	8.2 发光二极管	280
习题	222	8.2.1 发光材料	280
参考读物	225	8.2.2 光纤—光通信	282
自我测验	225	8.3 激光器	285
第7章 双极结型晶体管	229	8.4 半导体激光器	287
7.1 BJT的基本工作原理	229	8.4.1 PN结的粒子数反转	287
7.2 BJT的放大作用	231	8.4.2 PN结激光器的发射光谱	289
7.3 BJT制造	234	8.4.3 基本的半导体激光器	290
7.4 少数载流子分布和端电流	236	8.4.4 异质结激光器	290
7.4.1 基区扩散方程的求解	237	8.4.5 半导体激光器材料	292
7.4.2 端电流计算	238	小结	294
7.4.3 端电流的近似表达式	240	习题	294
7.4.4 电流传输系数	242	参考读物	296
7.5 BJT的一般偏置状态	243	自我测验	296
7.5.1 耦合二极管模型	243	第9章 集成电路	298
7.5.2 电荷控制分析	247	9.1 背景知识	298
7.6 BJT的开关特性	248	9.1.1 集成的优势	298
7.6.1 截止	249	9.1.2 集成电路的分类	299
7.6.2 饱和	250	9.2 集成电路的发展历程	300
7.6.3 开关周期	251	9.3 单片集成电路元件	302
7.6.4 开关晶体管的主要参数	252	9.3.1 CMOS工艺集成	302
7.7 某些重要的物理效应	252	9.3.2 绝缘体上硅(SOI)	312
7.7.1 基区内的载流子漂移	252	9.3.3 其他电路元件的集成	314
7.7.2. 基区变窄效应	253	9.4 电荷转移器件	317
7.7.3 雪崩击穿	254	9.4.1 MOS电容的动态效应	317
7.7.4 注入和热效应	255	9.4.2 基本CCD	318
7.7.5 基区电阻和发射极电流集边效应	256	9.4.3 CCD基本结构的改进	318
7.7.6 Gummel-Poon模型	257	9.4.4 CCD的应用	320
7.7.7 Kirk效应	261	9.5 ULSI	320
7.8 晶体管的频率限制	262	9.5.1 逻辑器件	323
7.8.1 结电容和充电时间	262	9.5.2 半导体存储器	329
7.8.2 渡越时间效应	264	9.6 测试、焊接和封装	337
7.8.3 Webster效应	264	9.6.1 测试	338
7.8.4 高频晶体管	265	9.6.2 引线压焊	339
7.9 异质结双极型晶体管	266	9.6.3 倒装片焊接技术	340
小结	267	9.6.4 封装	341
习题	268	小结	343
参考读物	270	习题	343
自我测验	270	参考读物	343
第8章 光电器件	272	自我测验	344
8.1 光电二极管	272	第10章 高频和大功率器件	345
8.1.1 光照下PN结的电流和电压	272	10.1 隧穿二极管	345

10.2 崩越二极管	347	自我测验	362
10.3 Gunn二极管	350	附录A 常用符号定义	363
10.3.1 电子输运机制	350	附录B 物理常数以及转换系数	367
10.3.2 空间电荷区的形成和漂移	352	附录C 半导体材料的特性	368
10.4 PN-PN二极管	353	附录D 导带状态密度的推导	369
10.4.1 基本结构	353	附录E 费米-迪拉克统计的推导	373
10.4.2 双晶体管近似	354	附录F 在Si(100)上生长的干、湿热 氧化层厚度随时间、温度变化的 关系	376
10.4.3 载流子注入时 α 的变化	355	附录G 杂质在Si中的固溶度	377
10.4.4 正偏关断状态	355	附录H Si和SiO ₂ 中杂质的扩散系数	378
10.4.5 导通状态	356	附录I Si中注入深度和范围与入射 能量之间的关系	379
10.4.6 触发机制	356	自我测验题部分答案	380
10.5 半导体控制整流器	357	索引	384
10.6 绝缘栅双极晶体管	359		
小结	361		
习题	361		
参考读物	362		

第1章 晶体性质和半导体生长

本章目标

- 描述什么是半导体
- 对晶体进行简单计算
- 理解什么是切克劳斯基 (Czochralski) 衬底和薄层外延晶体的生长
- 了解晶体的缺陷

研究固态电子器件时主要关心的是固体的电学行为。在后面的章节中我们将看到，金属或者半导体中的电荷传输不仅依赖于电子的性质，而且还和固体中原子的排列方式有关。在这一章中我们将讨论半导体区别于其他固体的物理性质、各种材料的原子排列方式以及半导体晶体的生长方法。介绍晶体结构与晶体生长技术等知识是教学的常规做法，本书作为导论性质的教材，只关注更重要且基本的概念，为理解半导体的电气特性和器件制造技术奠定基础。

1.1 半导体材料

半导体是导电性介于金属和绝缘体之间的一类材料。半导体材料的电导率随着温度、光激发的强度和杂质浓度等因素的改变可以发生重大的改变。正是基于这种电气特性的多样性，半导体材料才成为电子器件材料研究的自然选择。

半导体材料位于周期表（见表1-1）的第IV族及其附近的族中。第IV族的半导体硅（Si）和锗（Ge）被称为元素半导体，因为它们由单一种类的原子组成。除此之外，第III族和第V族元素的化合物、第II族和第VI族元素的化合物以及第IV族元素的化合物也是常用的半导体材料，称为化合物半导体。

如表1-1所示，很多半导体材料具有各不相同的电学性质和光学性质，这给工程师设计电子元件和光电元件时带来巨大的灵活性。在半导体器件的发展初期，半导体元素Ge广泛用于制造三极管和二极管。现在正广泛应用的整流器、晶体管和集成电路主要使用Si材料。某些高速器件和光电子器件则使用化合物半导体材料。III-V两族半导体元素的二元（binary）化合物（如GaN、GaP和GaAs）被广泛用作发光二极管（LED）的材料。从1.2.4节还可看到，诸如GaAsP这样的三元（ternary）化合物半导体和诸如InGaAsP这样的四元（quaternary）化合物半导体在材料性质的选择方面具有更大的灵活性。

电视屏幕的荧光材料常常是II-VI族化合物半导体材料，如ZnS。光探测器常常使用InSb、CdSe或者其他诸如PbTe和HgCdTe的化合物半导体来制造。Si和Ge也广泛用于红外探测器和核辐射探测器中。一种很重要的微波器件——Gunn二极管，就常常用GaAs或者InP来制造。半导体激光器则使用GaAs、AlGaAs以及其他三元和四元化合物半导体材料。

半导体区别金属和绝缘体的最重要的特性之一是，它具有能带间隙（energy band gap），该特性决定了能被半导体吸收或者发射的光的波长，我们将在第3章详细讨论这种特性。例如，GaAs的能带间隙大约为1.43eV（电子伏），因而发光的波长位于近红外区；GaP的能带间隙大约为2.3eV，故发光波长与可见光区中绿光的波长接近^①。附录C中列出了各种半导体材料的能带间隙 E_g 和其他

^① 光子能量 E （eV）和波长 λ （ μm ）之间的转换关系是 $\lambda = 1.24/E$ 。对GaAs来讲，波长 $\lambda = 1.24/1.43 = 0.87\mu\text{m}$ 。

一些特性。正是由于不同半导体具有不同的能带间隙，使用不同材料制作的发光二极管和激光器的发光波长也不同，从红外光到可见光都有。

表1-1 常见的半导体材料

(a) 半导体元素在周期表中的位置； (b) 元素半导体和化合物半导体

(a)	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	
		Al	Si	P	S
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Cd	In		Sb	Te
(b)	元素	IV化合物	二元III-V化合物	二元II-VI化合物	
	Si	SiC	AlP	ZnS	
	Ge	SiGe	AlAs	ZnSe	
			AlSb	ZnTe	
			GaN	CdS	
			GaP	CdSe	
			GaAs	CdTe	
			GaSb		
			InP		
			InAs		
			InSb		

半导体材料的电学特性和光学特性受杂质的影响很大，应该精确控制添加杂质的量。这些杂质能在很宽的范围内改变半导体的导电性，甚至改变导电机制，由负电荷载流子导电变成正电荷载流子导电。例如，即使引入百万分之一的杂质也可能使得Si从电流的不良导体变成良导体。这种添加受控杂质的过程称为掺杂，在后面的章节中将详细讨论。

为了研究半导体的这些有用性质，有必要了解材料中的原子排列情况。很明显，如果原始材料纯度的轻微改变能使电学特性发生巨大变化，那么每个半导体内原子自然、特定的排列方式必然有着很重要的作用。因此，我们先从晶体结构入手研究半导体的性质。

1.2 晶格

本节讨论各种固体的原子排列方式。我们首先把单晶和其他材料加以区别，然后研究晶格的周期性。参照基本的具有立方结构的晶体，我们定义并解释一些重要的结晶学术语，来认识晶面和晶向。最后，我们还将研究金刚石晶格，这是电子器件所使用的绝大多数半导体材料的典型结构。

1.2.1 周期结构

晶体的特征是其中的原子排列具有空间周期性，也就是说，整个固体内的晶体原子都是按某种基本单元重复排列的。因此从晶体中某一点看到的晶体结构与从其他等效点看到的晶体结构是完全相同的。但是，并非所有的固体都是晶体，如图1-1所示，有些固体的原子排列就没有任何周期性，我们将这样的固体称为非晶体。还有一些固体是由很多单晶体材料的小区域组成的，我们把这些固体称为多晶体。图6-33中高分辨率显微镜所拍的照片显示了晶体管沟道中单晶硅原子的周期性排列，与非晶体SiO₂（玻璃）的氧化层进行了对比。

晶体中原子的周期性是由被称为晶格的空间中的对称阵列点决定的。可在每个晶格格点上以

某种排列方式放置原子，称为一个基胞，它可以是一个原子，也可以是一个空间排列方式相同的原子群，称为晶胞。但不管如何排列，整个晶格总是可以由称为晶胞的基本单元按照某种规则重复排列而成。作为一个例子，图1-2给出了一个菱形晶格中原子的二维排列情形，其中ODEF代表一个原胞，它是最小的单元。定义这样的矢量 a 、 b ，若将某个原胞沿这些矢量的整数倍进行平移，则可以找到另一个完全相同的原胞，如O'D'E'F'。矢量 a 、 b （晶格为三维时还有矢量 c ），称为晶格的基矢。如果晶格中的两个格点的相对位置可以通过矢量来描述，那么这两个格点是不可区分的。

$$r = pa + qb + sc \quad (1-1)$$

其中 p 、 q 和 s 均为整数。原胞的选择并不是唯一的，但按照惯例常选择最小的基矢来表示原胞。原胞仅在角上有晶格点，这些格点为相邻的晶胞所共享，所以原胞的有效格点数总是1。固体内原子的放置方法有多种，故原子间的距离和方向也有多种形式，但是决定晶格的是对称性，而不是格点间的距离。

4

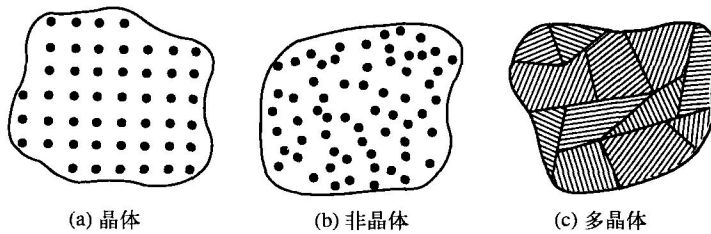


图1-1 按照原子排列进行分类，有三种类型的固体：(a) 晶体，(b) 非晶体，通过显微镜观察到的原子图像，(c) 多晶体，用显微镜观察到的多个相邻的单晶区域，类似于(a)中的晶体

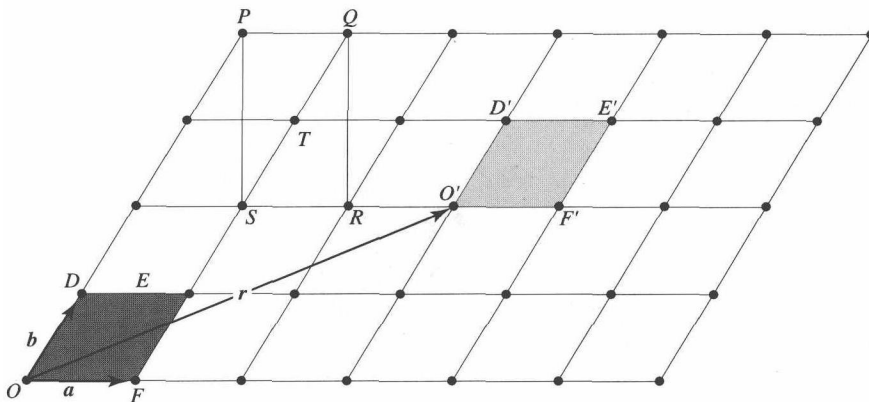


图1-2 晶格的二维排列，两个阴影区分别表示将原胞沿矢量 $r = 3a + 2b$ 平移前和平移后的位置

在描述某些晶格时，使用原胞并不是很方便。例如，由图1-2可以看到，格点的菱形排列方式也可以看作中央 T 处有一个格点的矩形排列（PQRS）（被称为中央矩形晶格），但并不是所有的菱形晶格都可以这样认为。显然，矩形比菱形处理起来要容易，所以，这里我们可以选择更大的矩形晶胞PQRS，而不选择最小的原胞ODEF。晶胞不仅在角上有格点，在表面中心也可能有格点（三维情况下体中心也可能有格点）。晶胞若能更好地反映晶格的对称性（本例中“中心带格点矩形”二维晶格），有些时候可以用来代替原胞。通过基矢的整数倍平移，晶格得以复制再现。

使用晶胞描述晶格的重要性在于它能代表整个晶格，研究一个晶胞就能了解整个晶体的全貌。例如，从晶胞的原子排列情况我们就可以知道最相近原子以及次相近原子间的距离，这对计算晶体的结合力很有用。我们还可以得知晶胞中原子所占的体积，并从原子的排列情况推算出固体的质量密度。更重要的是，对电子器件来说，所用材料的晶格周期特性决定了参与导电的那些电子的允许能量。总之，晶格结构不仅决定了晶体材料的力学性质，而且决定了其电学性质。

1.2.2 立方晶格

最简单的三维晶格的晶胞是立方体，如图1-3所示。简单立方结构 (sc) 晶胞的8个顶角处各有一个原子；体心立方 (bcc) 晶胞除了在8个顶角处有原子外，中心处还有一个原子；面心立方 (fcc) 晶胞的8个顶角处也有原子，同时在6个面的中心处还有原子。这3种晶格结构虽有不同的原胞，但有相同的立方晶胞。我们从立方晶胞入手进行研究。

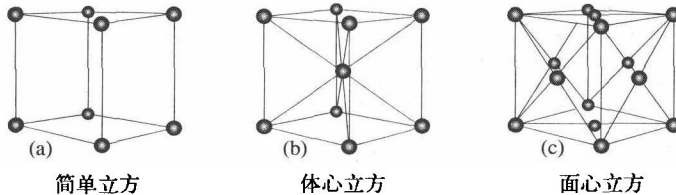


图1-3 3种立方晶格结构

当原子按上述任何一种情形组成晶格时，相邻原子的距离由原子间的吸引力和排斥力相平衡的条件决定。我们将在3.1.1节讨论固体结合力的性质，在这里我们把原子当作刚性球处理，以此来分析原子在晶胞中所能占据的最大体积比（堆积比）。图1-4画出了边长为 a 的面心立方晶胞，其中，每个刚性原子与其相邻原子恰好相切。立方晶胞的边长 a 叫做晶格常数。对于面心立方晶格，最相近原子之间的距离是面对角线的一半，即 $\frac{\sqrt{2}}{2}a$ ；要使面心处的原子恰好与顶角处的原子相切，原子半径就必须是最相近原子间距的一半，即 $\frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

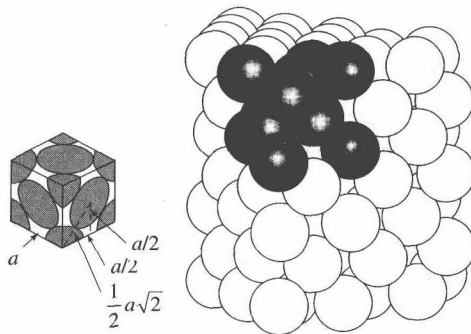


图1-4 面心立方晶格中刚性原子的堆积情况

例1-1

假设体心晶格的晶格常数为 5\AA ，每个原子都认为是相同的刚性原子，且与其相邻原子恰好相切，计算刚性原子的最大堆积比和原子半径。

解

因为体心立方晶胞中每个顶角处的原子都被7个相邻的晶胞所共有，所以每个顶角处只能计

为1/8个原子，8个顶角处总计有1个原子。立方体的中心还包含一个原子，故

$$\text{最相近原子的间距} = \frac{1}{2} \times \sqrt{5^2 + 5^2 + 5^2} = 4.330 \text{ \AA}$$

$$\text{每个原子的半径} = \frac{1}{2} \times 4.330 \text{ \AA} = 2.165 \text{ \AA}$$

$$\text{每个原子的体积} = \frac{4}{3} \pi (2.165)^3 = 42.5 \text{ \AA}^3$$

$$\text{每个立方体的原子数} = 1 + 8 \times \frac{1}{8} = 2$$

$$\text{原子堆积比} = \frac{42.5 \times 2}{(5)^3} = 68\%$$

即，如果原子在体心晶格中紧密排列，使得每个原子与其最相近原子相切，那么晶胞体积的68%将被原子所占据。这个比例与其他晶格相比是比较高的（参见习题1.14）。

1.2.3 晶面与晶向

用晶格中的晶面和晶向描述晶体是非常方便的。通常采用一组3个整数来标记晶面簇和晶向簇。我们先建立一个以任何格点为原点的xyz坐标轴（因为格点都是等同的），轴沿着立方晶胞的边。对某个特定的晶面，标记它的3个整数是按照如下步骤确定的。

(1) 将该平面在晶轴上的截距表示为基矢的整数倍，记下这3个整数（可在保持晶面取向不变的前提下平移该平面，使其靠近或者远离原点，使每个轴上的截距成为基矢的整数倍）。

(2) 取步骤(1)中记下的3个整数的倒数，将3个倒数通分得到最简的一组整数 h 、 k 、 l ，这3个整数之间的比例关系与3个倒数之间的比例关系一样。

(3) 将该平面记为 (hkl) 平面。

例1-2

如图1-5所示的晶面，它在3个晶轴上的截距分别是 $2a$ 、 $4b$ 和 $1c$ ，3个整数的倒数分别是 $1/2$ 、 $1/4$ 和 1 。将它们通分，得到最简的3个整数2、1和4。它们之间的比例关系与 $1/2$ 、 $1/4$ 、 1 之间的比例关系一样。因此，该晶面是一个 (214) 晶面。如果截距是晶格常数 a 的分数，则是一个例外，这时我们并不通分到最简的整数。例如，图1-3中与立方晶体表面平行的晶面穿过了体心立方晶格中的体心原子，这样晶面就是 (200) ，而不是 (100) 。

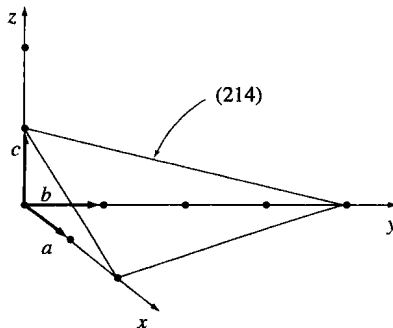


图1-5 (214) 晶面示例

3个整数 h 、 k 、 l 称为密勒指数，这3个数定义了晶格中一簇平行的晶面。确定密勒指数时之所

以采用截距的倒数，是为了避免出现无穷大的情况。比如，平行于某个晶轴的平面在该轴上的截距是无穷大，然而采用倒数后截距就是零。也就是说，如果一个晶面通过某个晶轴或者与该轴平行，那么相应的密勒指数就取为零。另外，如果一个晶面通过坐标原点，那么先将该晶面平移到一个新位置再确定密勒指数。如果截距在负半轴上，把负号写在相应的密勒指数的上方，如 $(h\bar{k}l)$ 。

从结晶学的观点来看，许多晶面的性质都是等价的。也就是说，只需要简单地选择晶胞的位置和方向，就可以在晶格中四处移动带有给定密勒指数的晶面。但在表示晶面簇时通常用花括号 $\{ \}$ 将密勒指数括起来，而不用圆括号 $()$ 。例如，图1-6所示立方体的6个面在结晶学上是等价的，因为晶胞可以向不同的方向旋转并且依然保持原有性质。将这6个等价的晶面标记为 $\{100\}$ 晶面簇。

用一个矢量的分量或者3个整数构成的集合都可以表示三维空间中某个特定的方向。矢量的3个分量都是基矢的倍数，可将它们化为最简的3个整数而保持比例关系不变。例如，图1-7a中立方晶格的体对角线的方向矢量有3个分量 $1a$ 、 $1b$ 、 $1c$ ，因此该晶向表示为 $[111]$ （方括号用来进行晶向索引）。与晶面的情形类似，晶格的许多晶向也是等价的，仅仅取决于轴方向的选择，用尖括号 $\langle \rangle$ 括起来的3个整数表示1个晶向簇。例如，图1-7b中的 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 等晶向都是等价的，可将这些等价的晶向称为 $\langle 100 \rangle$ 晶向簇。

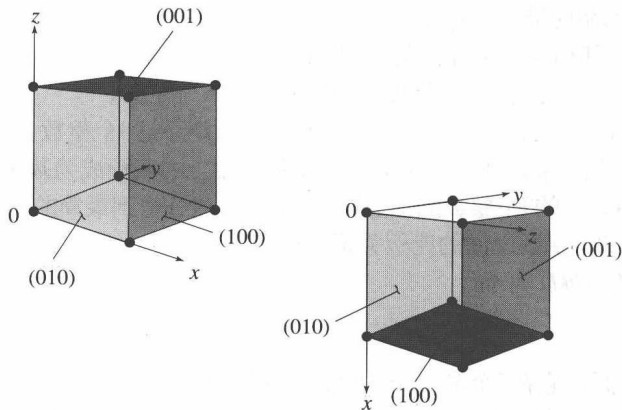


图1-6 晶胞 ($\{100\}$ 晶面) 在立方晶格中旋转时各晶面的等效性

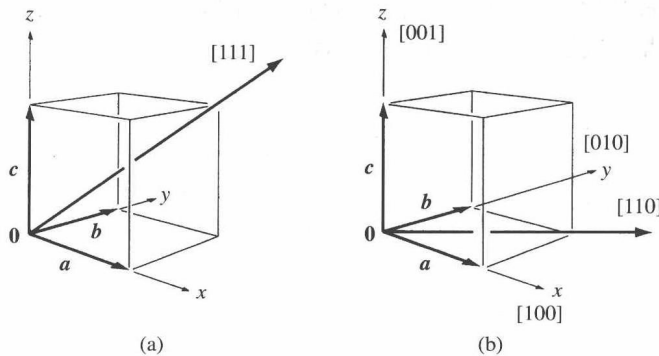


图1-7 立方晶格中的各个晶向

下面两个用密勒指数表示的关系式描述了晶面间的距离和晶向间的角度。两个标记为 (hkl) 的相邻晶面间的距离 d 由以下晶格常数表达式给出：