

忻贤堃 编著

# Semiconductor Physics and Devices Semiconductor Physics and Devices Semiconductor Physics and Devices Semiconductor

# 半导体物理与器件

上海科学技术文献出版社

# 半导体物理与器件

忻贤埜 编著

上海科学技术文献出版社

(沪)新登字 301 号

**半导体物理与器件**

析贤坤 编著

\*

上海科学技术文献出版社出版发行  
(上海市武康路 2 号 邮政编码 200031)

全国新华书店经销

上海科技文献出版社昆山联营厂印刷

\*

开本 787×1092 1/32 印张 12.25 字数 296,000

1996 年 2 月第 1 版 1996 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1—1000

ISBN 7-5439-0851-4/T·405

定 价: 19.80 元

《科技新书目》376-246

## 《半导体物理与器件》简介

本书结合各种半导体物理效应描述了多种常用的和特殊半导体器件的工作原理，它将帮助从事器件应用的工程技术人员从物理角度加深入了解各种半导体器件的原理，以便更正确灵活地应用各种器件。

全书内容丰富，叙述简明扼要，适宜于具有大学普通物理和高等数学基础的电子工程技术人员、相关专业的大学生和中学理科教师阅读，也可作为应用物理、电类非半导体专业的本科生教材。全书共九章，四章为基础部分，其余各章结合半导体的基本物理效应介绍了 20 余种半导体器件，其中有：整体效应器件、微波器件、光子器件、双极型和单极型器件等。各章附有习题和思考题，书末有中、英文索引。

# 序 言

半导体器件已成为电子工业、自动控制、计算技术、航空、通讯等方面不可缺少的组成部分。近十几年来各种新器件的应用、管路结合的发展以及电子线路计算机辅助设计对器件模型的研究,使半导体物理与半导体器件物理成为电子科学技术领域中极为重要的基础。

《半导体物理》与《半导体器件物理》是半导体器件专业两门重要课程。现有的两种公开出版物,无论其深度还是广度对侧重器件应用的电类非半导体专业以及物理专业是不合适的。为了对上述各专业加强半导体物理与器件物理方面的认识,也为了使广大使用器件的工程技术人员对器件内部有足够的了解,作者将必要的半导体物理基础知识与各种半导体器件融汇一体,使原来分属于两门课程的教材合并于一门,成为一本便于电类各专业工程技术人员了解各种器件工作原理及基本结构的有益工具,也可以成为有关专业的教学参考书。

若以本书作为教材,将有利于在教学中体现理论和实际相结合,也有助于在教学中注入与高新技术密切相关的知识,使原有的课程内容得以更新和补充并缩短教学时数。

国外对电类各专业本科学学生和研究生在半导体物理与器件方面的教学很重视,如英国皇家学院 D. A. Fraser 教授主编的半导体器件物理(The Physics of Semiconductor Devices)在1986年已出第四版,该书也是由两课程合并写就的。此外,如 S. M. Sze 1985年版的《半导体器件物理与技术》(Semicondu-

ctor Devices Physics and Technology), Harry E. Jalley, Don G. Daugherty 编著的《半导体器件物理原理》(Physical Principles of Semiconductor Devices)都具有这方面的特点。国内在 80 年代初出版了一些类似的著作,它们为两门课程的合一迈出了可喜的一步。近年来,未见类似之书出版,而半导体技术发展日新月异,因此有必要将其内容加以补充和更新。

综览《半导体物理与器件》一书将有如下几方面特点:

1. 物理效应与器件原理密切结合,全书涉及到 20 余种器件。
2. 以工科普通物理和高等数学为基础,在必须涉及量子物理与固体物理的场合作了必要的铺垫,使全书有一合适的起点。
3. 除了必要的半导体物理基础之外,在阐述器件原理时着重突出器件的物理图像并尽可能避免繁琐的数学推导。

本书是折贤堃同志根据自己的教学经验与科研实践编写而成就的,它的出版为有关专业提供了一本很好的教材,同时也可供工程技术人员参考。

中国科学院院士 沈天慧  
上海交通大学教授

1995.2.20

## 前 言

本书将半导体物理效应与各种常用半导体器件相结合，使从事电子工程或其它理工类专业的技术人员在阅读这本书后，能从物理角度深入了解各种半导体器件的工作原理。由于深入讨论本书界定的内容必须涉及量子力学、统计物理、场论、固体物理等专门知识，而一般非物理专业的技术人员往往又不具备这方面的基础，因此本书对涉及上述有关学科的地方作了适当的处理。这样，全书有了一个较为合适的起点，它将使读者不为高深的数理知识所困惑，也不至于有说理不透的感觉。从整体上来说，本书对于具有普通物理和高等数学基础的学生和工程技术人员是适宜的。

全书包括九章，其中第一、二、三、五章为一般的基础部分，其余各章结合基本效应介绍了 20 余种各类半导体器件，它们是：整体效应器件、微波器件、光子器件、双极型器件和单极型器件。在编写过程中参考了许多中外有关资料，其中属于书籍一类的有：S. M. Sze 的《Semiconductor Devices—Physics and Technology》(JOHN WILEY & SONS 1985)，D. A. Fraser 的《The Physics of Semiconductor Devices》(CLARENDON PRESS·OXFORD 1986)，Karlheinz Seeger 的《Semiconductor Physics》(Springer-Verlag 1985)，Harry E. Jolley, Don G. Daugherty 合著的《Physical Principles of Semiconductor Devices》(The Iowa State University Press, 1976)，以及刘恩科等编的《半导体物理学》(上海科技出版社, 1984)，宋

南辛等编的《晶体管原理》(国防工业出版社, 1980)等。这些著作也可以作为本课程教学或阅读的主要参考书。

为了便于复习巩固, 各章都给出了一些习题或思考题, 书末的中、英文对照索引为基本概念的查找提供一些方便。

在本书的编写过程中得到了许多专家的热忱指导和鼓励, 作者尤其要感谢吉林大学电子科学系名誉系主任高鼎三教授和上海大学安其霖副教授, 他们分别审阅了大部分书稿并提出了许多宝贵的意见。作者还要感谢中国科学院院士、上海交通大学沈天慧教授, 她在百忙中为本书作了序。本书的顺利出版也应归功于曹明道先生, 他为作者提供了许多宝贵的资料。上海交通大学的汪师俊教授也为本书的出版付出了辛勤的劳动, 在此一并致谢。

半导体器件的发展日新月异, 本人的学识和能力很有限, 书中一定有不少疏漏或不当之处, 敬请读者批评指正。

忻贤堃 1995年2月于上海



# 目 录

第一章 晶体结构和半导体材料的制备 .....	1
§ 1.1 半导体材料 .....	1
§ 1.2 晶体结构 .....	4
1.2.1 周期性结构 .....	5
1.2.2 立方晶系中的几种晶胞 .....	6
1.2.3 晶面、晶向、晶面间距 .....	8
1.2.4 金刚石型结构 .....	12
§ 1.3 半导体晶体材料的制备 .....	13
1.3.1 布里奇曼法 .....	14
1.3.2 直拉法 .....	15
1.3.3 浮区生长法 .....	17
§ 1.4 化合物半导体和半导体薄膜的生长 .....	18
第二章 固体中的电子 .....	24
§ 2.1 孤立原子中电子的状态 .....	24
§ 2.2 能带概述 .....	26
2.2.1 能带的一般概念 .....	26
2.2.2 晶体中电子的共有化运动和能带的形成 .....	28
§ 2.3 能量-波数图 .....	31
2.3.1 自由电子的状态和薛定谔方程 .....	31
2.3.2 晶体中的薛定谔方程及其解的形式 .....	34
2.3.3 克龙尼克-潘纳模型和能量-波数图 .....	35
2.3.4 倒格子和三维晶格的布里渊区 .....	40
2.3.5 周期性边界条件 .....	43

§ 2.4	有效质量	44
§ 2.5	硅、锗、砷化镓的能带构造	46
§ 2.6	$k$ 空间和 $k$ 空间等能面	47
2.6.1	$k$ 空间和等能面	47
2.6.2	硅、锗砷化镓的导带等能面	49
§ 2.7	态密度函数	51
§ 2.8	费米-狄拉克统计	54
§ 2.9	热平衡载流子浓度和本征载流子浓度	57
§ 2.10	杂质与掺杂半导体的载流子浓度	62
2.10.1	施主杂质	62
2.10.2	受主杂质	63
2.10.3	杂质补偿和掺杂半导体的载流子浓度	64
<b>第三章</b>	<b>载流子的输运</b>	<b>68</b>
§ 3.1	载流子的漂移运动	68
3.1.1	迁移率	68
3.1.2	散射	70
3.1.3	晶格散射与电离杂质散射对迁移率的影响	74
§ 3.2	半导体的电导率	78
§ 3.3	半导体电阻率的测量	79
§ 3.4	高场效应	84
§ 3.5	载流子的扩散运动	86
3.5.1	独立粒子图像	86
3.5.2	集合平均描述	86
3.5.3	爱因斯坦关系	88
§ 3.6	载流子的注入	89
§ 3.7	载流子的产生与复合	91
3.7.1	跃迁率与跃迁过程	91
3.7.2	直接复合	93

3.7.3	间接复合	95
3.7.4	扩散长度	98
§ 3.8	连续性方程	99
3.8.1	方程的建立	99
3.8.2	连续性方程求解举例	101
<b>第四章</b>	<b>体效应与均质半导体器件</b>	<b>109</b>
§ 4.1	电阻的温度特性及热敏电阻	109
4.1.1	半导体电阻率的范围	109
4.1.2	表面电阻率	110
4.1.3	载流子浓度、电导率随温度的变化	112
4.1.4	半导体热敏电阻	115
§ 4.2	热电效应	116
4.2.1	热电效应	116
4.2.2	塞贝克效应分析	119
4.2.3	热电效应的实际应用	122
§ 4.3	电磁效应	125
4.3.1	霍尔效应	125
4.3.2	磁阻效应	128
§ 4.4	压阻效应	131
4.4.1	锗在流体静压作用下的压阻效应	131
4.4.2	单向应力作用下的压阻效应	132
4.4.3	半导体的压阻系数	134
4.4.4	压力敏感器件	135
§ 4.5	光电导效应	137
4.5.1	光电导 光电导弛豫及增益	138
4.5.2	光敏电阻	142
<b>第五章</b>	<b>p-n 结</b>	<b>146</b>
§ 5.1	热平衡 p-n 结	146
5.1.1	p-n 结接触电势差	147

5.1.2	平衡 p-n 结的费米能级	148
5.1.3	p-n 结能带图的画法	150
§ 5.2	p-n 结的耗尽层	150
§ 5.3	准费米能级和非平衡 p-n 结	155
5.3.1	准费米能级	155
5.3.2	非平衡 p-n 结	157
§ 5.4	正向偏置时 p-n 结边界上的少数载流子浓度	163
§ 5.5	p-n 结的电流-电压方程	165
§ 5.6	p-n 结的耗尽层电容	171
§ 5.7	p-n 结的扩散电容	173
§ 5.8	p-n 结的击穿	175
5.8.1	隧道击穿	176
5.8.2	雪崩击穿	179
<b>第六章</b>	<b>微波器件</b>	<b>185</b>
§ 6.1	隧道二极管	185
§ 6.2	碰撞雪崩渡越时间二极管	190
6.2.1	器件的结构	191
6.2.2	动态特性	193
§ 6.3	势垒注入渡越时间二极管	197
6.3.1	器件的结构	197
6.3.2	动态特性	199
§ 6.4	转移电子器件	201
6.4.1	转移电子效应	202
6.4.2	转移电子器件	205
§ 6.5	负阻振荡机理	208
<b>第七章</b>	<b>光子器件</b>	<b>213</b>
§ 7.1	辐射跃迁与光吸收	214
7.1.1	辐射跃迁	212

7.1.2	辐射跃迁的种类	214
7.1.3	光吸收	218
§ 7.2	发光二极管	221
7.2.1	可见光发光二极管	221
7.2.2	红外发光二极管	226
§ 7.3	半导体激光器	227
7.3.1	半导体激光器的结构	228
7.3.2	半导体激光器的运行	230
§ 7.4	太阳电池	234
7.4.1	太阳辐射	235
7.4.2	p-n 结太阳电池	237
7.4.3	异质面太阳电池	243
7.4.4	肖特基势垒和 MIS 太阳电池	246
7.4.5	太阳电池的改进及设计制造中的几个问题	249
7.4.6	聚光太阳电池	252
§ 7.5	光探测器	254
7.5.1	光敏二极管	254
7.5.2	雪崩光敏二极管	261
<b>第八章</b>	<b>双极型晶体管和闸流晶体管</b>	<b>264</b>
§ 8.1	双极型晶体管概述	264
8.1.1	放大工作模式	265
8.1.2	电流增益	269
§ 8.2	静态特性	271
8.2.1	理想晶体管的端电流	271
8.2.2	发射效率与基区输运因子	277
8.2.3	四种工作模式	278
§ 8.3	静态特性的修正	280
8.3.1	缓变基区的自建场对载流子运输的影响	280
8.3.2	发射结耗尽层复合的影响	281

8.3.3	基区宽度调变效应 .....	283
§ 8.4	基极电阻 .....	286
§ 8.5	反向电流和击穿电压 .....	288
8.5.1	反向电流 .....	288
8.5.2	击穿电压 .....	290
§ 8.6	频率和开关特性 .....	292
8.6.1	Ebers-Moll 模型 .....	292
8.6.2	频率特性 .....	294
8.6.3	开关特性 .....	300
§ 8.7	闸流晶体管 .....	305
8.7.1	基本特征与工作原理 .....	305
8.7.2	双向闸流晶体管 .....	312
<b>第九章</b>	<b>场效应晶体管 .....</b>	<b>315</b>
§ 9.1	结型场效应晶体管 .....	316
9.1.1	工作原理 .....	316
9.1.2	电流-电压特性 .....	318
9.1.3	漏极电导与跨导 .....	321
9.1.4	小信号等效电路 .....	322
9.1.5	截止频率 .....	325
§ 9.2	MOS 结构 .....	326
9.2.1	理想 MOS 结构 .....	327
9.2.2	理想 MOS 结构的电容-电压特性 .....	334
9.2.3	实际 MOS 结构的电容-电压特性 .....	338
9.2.4	MOS 结构的阈值电压 .....	346
§ 9.3	金属-氧化物-半导体场效应晶体管 .....	347
9.3.1	构造及工作原理 .....	348
9.3.2	电流-电压特性 .....	350
9.3.3	等效电路与频率特性 .....	354
9.3.4	MOSFET 的类型 .....	355

附录 I 常用物理常数 .....	358
附录 II 主要半导体的物理性质 .....	359
索引 .....	360

# 第一章 晶体结构和半导体材料的制备

金属或半导体中电荷的传播不仅与电子的性质有关而且与固体中原子、分子或离子的排列有关,因此在这一章中将介绍一些晶体结构方面的知识和半导体晶体的生长方法。由于此类问题的讨论常常是某些专著的任务,因此在这里只是简要地介绍一些与半导体中电子性质及器件原理有关的内容。假如需要作深入的了解可参阅有关专著。

## § 1.1 半导体材料

自然界各种物质的电导率分布于一个十分广阔的数量级范围。图 1.1 列出了若干物质的电导率。由图可见,金属铜与绝缘体石英的电导率之比可达  $10^{24}$ 。这一比值比地球半径与电子半径之比( $10^{21}$ )还大。半导体是一系列电导率介于金属和绝缘体之间的材料。除了这一特征之外,半导体材料的电导率在很宽的范围还随温度、光激发和杂质含量的改变而变化。

图 1.2 是锗(半导体)和铜的电导率与温度的关系。由图可见,锗的电导率在 200 K 至 500 K 范围内随温度的变化比同温度范围内铜的电导率随温度的变化要灵敏得多,而且半导体的电导率随温度增加而迅速增加,而金属的电导率则随温度升高却慢慢下降。由于半导体中的载流子浓度与电导率成正比,因此掺入半导体的微量杂质如果在室温下全部电离时,就可能使载流子(电子或带正电的空穴)浓度剧增,从而使电导率也急剧



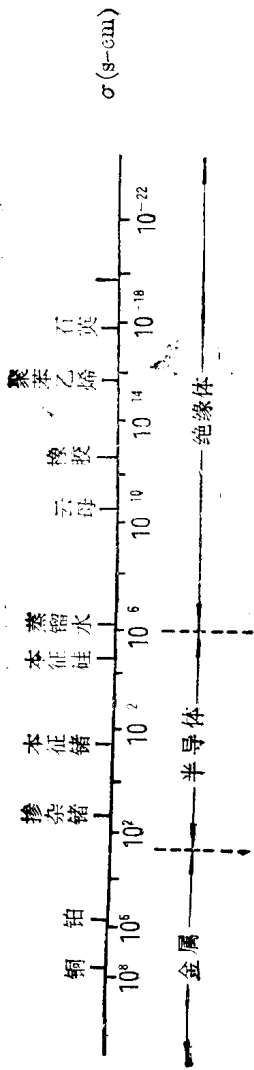


图 1.1 各种材料的电导率

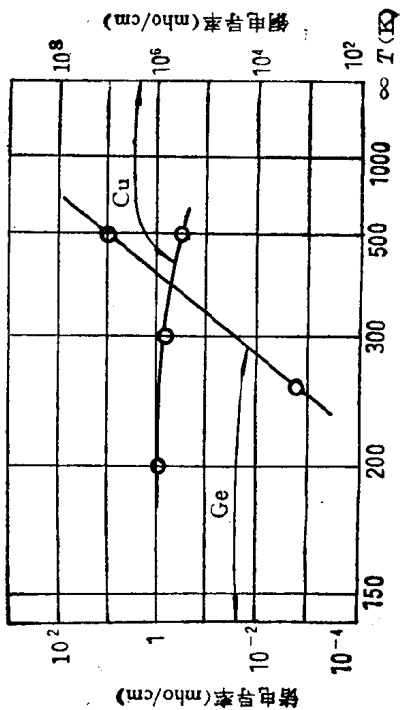


图 1.2 锗和铜的电导率随温度的变化

与图 1.1 比较?