




普通高等教育“十二五”规划教材

高等学校电子信息类教材

# 半导体器件物理 (第2版)

Semiconductor Devices & Physics, 2<sup>nd</sup> Edition

© 刘树林 商世广 柴常春 张华曹 编著

 中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材

高等学校电子信息类教材

# 半导体器件物理 (第2版)

**Semiconductor Devices & Physics, 2<sup>nd</sup> Edition**

刘树林 商世广 柴常春 张华曹 编著

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书由浅入深、系统地介绍了常用半导体器件的基本结构、工作原理和工作特性。为便于读者自学和参考,本书首先介绍了学习半导体器件必需的半导体材料和半导体物理的基本知识;然后重点论述了PN结、双极型晶体管、MOS场效应管和结型场效应管的各项性能指标参数及其与半导体材料参数、工艺参数和器件几何结构参数的关系;最后简要讲述了功率MOSFET、IGBT和光电器件等其他常用半导体器件的原理及应用。

本书可作为电子信息类专业(特别是微电子科学与工程、集成电路设计与集成系统及电子科学与技术等专业)及相关专业本科生、研究生的教材或参考书,也可供工程技术人员参考。

本书电子教学课件(PPT文档)可从华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))免费注册后下载,或者通过与本书责任编辑([zhangls@phei.com.cn](mailto:zhangls@phei.com.cn))联系获取。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体器件物理/刘树林等编著. —2版. —北京:电子工业出版社, 2015.9

高等学校电子信息类教材

ISBN 978-7-121-27049-9

I. ①半… II. ①刘… III. ①半导体器件—半导体物理—高等学校—教材 IV. ①TN303 ②O47

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第203845号

责任编辑:张来盛([zhangls@phei.com.cn](mailto:zhangls@phei.com.cn))

印 刷:三河市兴达印务有限公司

装 订:三河市兴达印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.5 字数:499千字

版 次:2005年2月第1版

2015年9月第2版

印 次:2015年9月第1次印刷

印 数:2500册 定价:45.80元

凡购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

《半导体器件物理》适合作为微电子科学与工程、集成电路设计与集成系统以及电子科学与技术等专业及相关专业本科生、研究生的教材或教学参考书，同时也可供其他相关专业工程技术人员阅读参考。由于各个学校情况不同，采用的教材名称可能不同，如《晶体管原理》、《微电子技术基础》和《半导体物理与器件》等。本书所阐述的各类常用半导体器件的基本结构、工作原理和工作特性，是从事半导体器件乃至集成电路设计、制造和应用等方面工作的专业技术人员必须掌握的基础理论知识。

本教材在内容的选取和编排上，力求选材实用、难度适中；在内容的叙述方面力求突出重点、条理清晰、深入浅出、通俗易懂，尽量避免冗长而烦琐的公式推导，从而使得器件的物理概念更清晰，内容更精练，以便于读者理解和掌握相关内容的要点。考虑到教材的系统性和相对独立性，本教材在介绍半导体材料和半导体物理等基本知识的基础上，依次系统地阐述了 PN 结、双极型晶体管、MOS 场效应晶体管、结型场效应管和一些常用的其他半导体器件的基本结构、工作原理和物理特性等内容。

自本教材第 1 版出版发行以来，得到了相关院校师生及工程技术人员的好评和欢迎，使用本教材的院校和老师还提出了许多宝贵意见和建议。据此，第 2 版在保持第 1 版理论体系的基础上主要做了以下几个方面的修改：

(1) 对第 4 章的内容进行了较大修改。除了修正第 1 版中的错漏之外，还在推导 MOS 场效应晶体管阈值电压之前，详细地介绍了 MOS 结构能带和性能，有助于读者对阈值电压受不同影响因素作用的理解。

(2) 对第 1、2、3、5 和 6 章存在的一些错误和不足进行了修正、完善。

(3) 制作了全书的 PPT 课件，任课教师可登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 免费注册后下载；部分章节的课件须提供相关信息后通过与本书责任编辑 (zhangls@phei.com.cn) 联系获取。

(4) 编写了全书课后习题解答要点和过程的辅导配套教材，可供选用该书的老师、学生及工程技术人员教学和学习参考。

本教材的参考学时为 64~80 学时，各院校可根据具体情况而定。

本书第 2 版主要由刘树林、商世广、柴常春和张华曹编著。其中第 1 章由柴常春编写，第 2、3 章由刘树林编写，第 4 章由商世广编写，第 5、6 章由张华曹编写，习题解答要点和过程的辅导配套教材由刘树林、商世广编写。商世广同时参与了第 1、2、3、5、6 章内容的修正和完善工作，并制作了全书的 PPT 课件。参加本书编写工作的还有孙龙杰、朱樟明、余宁梅、张琼、王箫扬等。全书由西安电子科技大学杨银堂教授主审，杨教授仔细审阅了书稿，提出了许多宝贵的建议，在此表示诚挚的感谢。

另外，本书的出版得到电子工业出版社的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中难免存在不足、不妥或错误之处，恳请有关专家和广大读者批评指正。

编著者

2015 年 5 月

## 主要常用符号说明

$A$	PN 结面积	$E_C$	导带底能量
$A_E$	发射结面积	$E_V$	价带顶能量
$A_C$	集电结面积	$E_g$	禁带宽度
$a_j$	线性缓变结杂质浓度梯度	$E_M$	PN 结最大电场强度
$B$	基极	$f_T$	特征频率, 截止频率
$BU_{EB0}$	集电极开路时, 发射极-基极 击穿电压	$f_\beta$	$\beta$ 截止频率
$BU_{CB0}$	发射极开路时, 集电极-基极 击穿电压	$f_\alpha$	$\alpha$ 截止频率
$BU_{CE0}$	基极开路时, 集电极-发射极 击穿电压	$f_0$	渡越时间截止频率
$BU_{DS}$	漏源击穿电压	$f_M$	最高振荡频率
$BU_{GS}$	栅源击穿电压	$g_m$	跨导
$C$	集电极	$g_d$	漏电导
$C_T$	PN 结势垒电容	$I_n$	电子电流
$C_D$	PN 结扩散电容	$I_p$	空穴电流
$C_{OX}$	单位面积栅氧化层电容	$I_D$	漏极电流
$C_G$	全沟道夹断时栅 PN 结电容	$I_0$	PN 结二极管反向饱和电流
$C_{GS}$	栅源电容	$I_R$	PN 结二极管反向电流
$C_{DS}$	漏源电容	$I_E$	发射极电流
$C_{GD}$	栅漏电容	$I_B$	基极电流
$D$	漏极	$I_C$	集电极电流
$D_n$	电子扩散系数	$I_{VB}$	基区复合电流
$D_p$	空穴扩散系数	$I_S$	双极晶体管饱和电流
$D_{ne}$	发射区电子扩散系数	$I_{CBO}$	集电极-基极反向电流
$D_{pe}$	发射区空穴扩散系数	$I_G$	栅极电流
$D_{nb}$	基区电子扩散系数	$I_{Dsat}$	饱和漏极电流
$D_{pb}$	基区空穴扩散系数	$I_{DSS}$	最大饱和漏极电流
$D_{nc}$	集电区电子扩散系数	$I_{Dsub}$	亚阈值电流
$D_{pc}$	集电区空穴扩散系数	$i_g$	栅极交流小信号电流
$d$	外延层厚度	$i_d$	漏极交流小信号电流
$E$	发射极, 电场强度	$i_e$	发射极交流小信号电流
$E_F$	费米能级	$i_b$	基极交流小信号电流
$E_{FN}$	电子准费米能级	$i_c$	集电极交流小信号电流
$E_{FP}$	空穴准费米能级	$J_n$	电子电流密度
$E_i$	本征能级	$J_p$	空穴电流密度
		$J_{pE}$	发射区空穴电流密度
		$J_{nB}$	基区电子电流密度

$J_{pC}$	集电区空穴电流密度	$t_d$	延迟时间
$J_{pB}$	基区空穴电流密度	$t_r$	上升时间
$k$	波矢	$t_s$	储存时间
$k_B$	玻耳兹曼常数	$t_f$	下降时间
$L_n$	电子扩散长度	$t_{on}$	开启时间
$L_p$	空穴扩散长度	$t_{off}$	关断时间
$L_{nB}$	基区电子扩散长度	$t_{OX}$	二氧化硅层厚度
$L$	沟道长度	$U$	电压
$L_{eff}$	有效沟道长度	$U_B$	PN 结雪崩击穿电压
$M$	倍增系数	$U_E$	基极-发射结电压
$m$	超相移因子	$U_C$	基极-集电结电压
$N$	N 区或 N 型半导体	$U_D$	接触电势差
$N_D$	施主杂质浓度	$U_{CE}$	集电极-发射极电压
$N_A$	受主杂质浓度	$U_{PT}$	穿通电压
$N_C$	外延层杂质浓度	$U_{CES}$	饱和压降
$n$	电子浓度	$U_{GS}$	栅源电压
$n_i$	本征电子浓度	$U_{DS}$	漏源电压
$n_N$	N 区电子浓度	$U_{BS}$	衬源电压
$n_P$	P 型区非平衡电子浓度	$U_T$	阈电压
$P$	P 区或 P 型半导体	$U_{Dsat}$	饱和漏源电压
PN	PN 结	$U_S$	表面势
$p$	空穴浓度	$U_{FB}$	平带电压
$p_P$	P 型区空穴浓度	$U_{OX}$	二氧化硅层电压降
$p_N$	N 型区空穴浓度	$U_{on}$	导通电压
$Q$	电荷	$U_p$	夹断电压
$Q_G$	栅电荷	$W_N$	PN 结二极管中性 N 区宽度
$Q_b$	基区电荷	$W_P$	PN 结二极管中性 P 区宽度
$Q_{OX}$	二氧化硅层电荷	$W_b$	有效基区宽度
$Q_n$	表面反型层电子电荷	$W_e$	中性发射区宽度
$Q_p$	表面反型层空穴电荷	$W_c$	中性集电区宽度
$q$	电子电荷	$W$	沟道宽度
$R_S$	方块电阻	$X_j$	结深
$r_b$	基极电阻	$X_{jc}$	集电结深度
$r_{CS}$	集电极串联电阻	$X_{je}$	发射结深度
$r_{ES}$	发射极串联电阻	$X_m$	PN 结空间电荷区宽度
$r_s$	源极串联电阻	$\alpha$	共基极电流增益
$r_g$	栅极串联电阻	$\alpha_n$	电子电离率
$r_d$	漏极串联电阻	$\alpha_p$	空穴电离率
$S$	饱和深度	$\beta$	共发射极电流增益
$S_E$	发射结宽度		

$\beta^*$	基区输运系数	$\sigma$	电导率
$v$	载流子漂移速度	$\sigma_n$	电子电导率
$\gamma$	发射极注入效率	$\sigma_p$	空穴电导率
$\Delta n_p$	P 区过剩电子浓度	$\tau_n$	电子寿命
$\Delta p_N$	N 区过剩空穴浓度	$\tau_p$	空穴寿命
$\varepsilon_0$	真空介电常数	$\tau_b$	基区渡越时间
$\varepsilon_{OX}$	二氧化硅介电常数	$\tau_e$	发射区渡越时间
$\varepsilon_S$	半导体介电常数	$\tau_d$	集电结空间电荷区渡越时间
$\mu_n$	电子迁移率	$\phi_{MS}$	栅金属-衬底硅功函数差
$\mu_p$	空穴迁移率	$\phi_{SS}$	栅多晶硅-衬底硅功函数差
$\mu_{eff}$	有效表面迁移率	$\psi_F$	衬底硅费米势
$\rho$	电阻率		

# 目 录

第 1 章 半导体物理基础	(1)
1.1 半导体晶体结构和缺陷	(1)
1.1.1 半导体的晶体结构	(1)
1.1.2 晶体的晶向与晶面	(2)
1.1.3 半导体中的缺陷	(4)
1.2 半导体的能带与杂质能级	(5)
1.2.1 半导体中电子共有化运动与能带	(5)
1.2.2 半导体中的 $E(k) \sim k$ 关系、有效质量和 $k$ 空间等能面	(9)
1.2.3 Si、Ge 的能带结构及本征半导体	(12)
1.2.4 杂质半导体	(13)
1.3 半导体中的平衡与非平衡载流子	(16)
1.3.1 导带电子浓度与价带空穴浓度	(16)
1.3.2 本征载流子浓度与本征费米能级	(19)
1.3.3 杂质半导体的载流子浓度	(21)
1.3.4 简并半导体及其载流子浓度	(25)
1.3.5 非平衡载流子的产生与复合及准费米能级	(26)
1.3.6 非平衡载流子的寿命与复合理论	(28)
1.4 半导体中载流子的输运现象	(31)
1.4.1 载流子的漂移运动与迁移率	(31)
1.4.2 半导体中的主要散射机构及迁移率与平均自由时间的关系	(32)
1.4.3 半导体的迁移率、电阻率与杂质浓度和温度的关系	(35)
1.4.4 载流子的扩散运动及爱因斯坦关系	(37)
1.4.5 连续性方程	(40)
1.5 半导体表面	(40)
1.5.1 半导体表面和表面能级	(40)
1.5.2 Si-SiO <sub>2</sub> 系统中的表面态与表面处理	(41)
1.5.3 表面能带弯曲与反型	(43)
1.5.4 表面复合	(44)
思考题和练习题	(44)
第 2 章 PN 结	(46)
2.1 平衡 PN 结	(46)
2.1.1 PN 结的制造工艺和杂质分布	(46)
2.1.2 平衡 PN 结的空间电荷区和能带图	(48)
2.1.3 平衡 PN 结的载流子浓度分布	(50)
2.2 PN 结的直流特性	(51)



2.2.1	PN 结的正向特性	(51)
2.2.2	PN 结的反向特性	(57)
2.2.3	PN 结的伏安特性	(59)
2.2.4	影响 PN 结伏安特性的因素	(61)
2.3	PN 结空间电荷区的电场和宽度	(66)
2.3.1	突变结空间电荷区的电场和宽度	(66)
2.3.2	缓变结空间电荷区的电场和宽度	(70)
2.4	PN 结的击穿特性	(72)
2.4.1	击穿机理	(73)
2.4.2	雪崩击穿电压	(74)
2.4.3	影响雪崩击穿电压的因素	(79)
2.5	PN 结的电容效应	(82)
2.5.1	PN 结的势垒电容	(82)
2.5.2	PN 结的扩散电容	(87)
2.6	PN 结的开关特性	(88)
2.6.1	PN 结的开关作用	(88)
2.6.2	PN 结的反向恢复时间	(89)
2.6.3	提高 PN 结开关速度的途径	(91)
2.7	金属-半导体的整流接触和欧姆接触	(93)
2.7.1	金属-半导体接触的表面势垒	(93)
2.7.2	金属-半导体接触的整流效应与肖特基二极管	(95)
2.7.3	欧姆接触	(97)
	思考题与习题	(98)
<b>第 3 章</b>	<b>双极型晶体管</b>	<b>(100)</b>
3.1	晶体管的基本结构、制造工艺和杂质分布	(100)
3.1.1	晶体管的基本结构和分类	(100)
3.1.2	晶体管的制造工艺和杂质分布	(101)
3.1.3	均匀基区晶体管和缓变基区晶体管	(102)
3.2	晶体管的电流放大原理	(103)
3.2.1	晶体管的能带及其载流子的浓度分布	(103)
3.2.2	晶体管载流子的传输及各极电流的形成	(104)
3.2.3	晶体管的直流电流-电压关系	(107)
3.2.4	晶体管的直流电流放大系数	(110)
3.2.5	影响晶体管直流电流放大系数的因素	(116)
3.3	晶体管的直流伏安特性曲线	(121)
3.3.1	共基极连接的直流特性曲线	(122)
3.3.2	共发射极连接的直流特性曲线	(123)
3.3.3	两种组态输出特性曲线的比较	(124)
3.4	晶体管的反向电流与击穿特性	(124)
3.4.1	晶体管的反向电流	(125)

3.4.2	晶体管的反向击穿电压	(126)
3.4.3	穿通电压	(130)
3.5	晶体管的频率特性	(131)
3.5.1	晶体管交流特性和交流小信号传输过程	(131)
3.5.2	晶体管的高频等效电路和交流电流放大系数	(134)
3.5.3	晶体管的频率特性曲线和极限频率参数	(141)
3.5.4	晶体管的噪声	(145)
3.6	晶体管的功率特性	(148)
3.6.1	基区大注入效应	(148)
3.6.2	基区扩展效应	(153)
3.6.3	发射极电流集边效应	(156)
3.6.4	集电结最大耗散功率和晶体管的热阻	(159)
3.6.5	晶体管的二次击穿	(163)
3.6.6	集电极最大工作电流和安全工作区	(166)
3.7	晶体管的开关特性	(167)
3.7.1	晶体管的开关作用	(167)
3.7.2	晶体管的开关波形和开关时间的定义	(170)
3.7.3	晶体管的开关过程和影响开关时间的因素	(172)
3.7.4	提高开关晶体管开关速度的途径	(175)
3.7.5	开关晶体管的正向压降和饱和压降	(176)
3.8	晶体管的设计	(177)
3.8.1	晶体管设计的一般方法	(178)
3.8.2	晶体管的纵向设计	(180)
3.8.3	晶体管的横向设计	(183)
	思考题和习题	(189)
<b>第4章</b>	<b>MOS 场效应晶体管</b>	(192)
4.1	MOS 场效应晶体管的基本结构、工作原理和输出特性	(192)
4.1.1	MOS 场效应晶体管的基本结构	(192)
4.1.2	MOS 场效应管的基本工作原理和输出特性	(193)
4.1.3	MOS 场效应晶体管的分类	(196)
4.2	MOS 场效应晶体管的阈值电压	(197)
4.2.1	MOS 场效应晶体管阈值电压的定义	(197)
4.2.2	MOS 结构的能带及特性	(197)
4.2.3	MOS 场效应晶体管的阈值电压	(201)
4.2.4	非平衡态 MOS 场效应晶体管的阈值电压	(205)
4.2.5	阈值电压的调整技术	(207)
4.3	MOS 场效应晶体管的直流电流-电压特性	(211)
4.3.1	MOS 场效应晶体管线性区的电流-电压特性	(212)
4.3.2	MOS 场效应晶体管饱和区的电流-电压特性	(213)
4.3.3	MOS 场效应晶体管亚阈值区的电流-电压特性	(214)

4.3.4	MOS 场效应晶体管击穿区特性及击穿电压	(215)
4.4	MOS 结构的电容-电压特性	(218)
4.4.1	理想 MOS 结构的电容-电压特性	(218)
4.4.2	非理想 MOS 结构的电容-电压特性	(221)
4.5	MOS 场效应管的交流小信号参数和频率特性	(225)
4.5.1	MOS 场效应管的交流小信号参数	(225)
4.5.2	MOS 场效应晶体管的频率特性	(228)
4.6	MOS 场效应晶体管的开关特性	(229)
4.6.1	MOS 场效应晶体管瞬态开关过程	(229)
4.6.2	开关时间的计算	(230)
4.7	MOS 场效应晶体管的二级效应	(232)
4.7.1	MOS 场效应晶体管的非常数表面迁移率效应	(232)
4.7.2	MOS 场效应晶体管的体电荷效应	(233)
4.7.3	MOS 场效应晶体管的短沟道效应	(234)
4.7.4	MOS 场效应晶体管的窄沟道效应	(237)
4.8	MOS 场效应晶体管温度特性	(238)
4.8.1	热电子效应	(238)
4.8.2	迁移率随温度的变化	(239)
4.8.3	阈值电压与温度关系	(239)
4.8.4	MOS 场效应晶体管几个主要参数的温度关系	(240)
	思考题与习题	(241)
<b>第 5 章</b>	<b>结型场效应晶体管及金属-半导体场效应晶体管</b>	<b>(242)</b>
5.1	JFET 及 MESFET 的结构、工作原理和分类	(242)
5.1.1	JFET 及 MESFET 的结构	(242)
5.1.2	JFET 工作原理和输出特性	(243)
5.1.3	JFET 和 MESFET 的分类	(244)
5.2	JFET 的电流-电压特性	(245)
5.2.1	线性区电流-电压特性	(246)
5.2.2	饱和区电流-电压特性	(247)
5.2.3	亚阈值区特性	(250)
5.3	JFET 的直流和交流小信号参数	(251)
5.3.1	JFET 的直流参数	(251)
5.3.2	JFET 的交流小信号参数	(254)
5.4	JFET 的高频参数	(256)
5.4.1	截止频率 $f_T$	(256)
5.4.2	渡越时间截止频率 $f_0$	(257)
5.4.3	最高振荡频率 $f_M$	(258)
5.5	短沟道 JFET 和 MESFET	(258)
5.5.1	短沟道 JFET 和 MESFET 中的迁移率调制效应	(258)
5.5.2	短沟道 JFET 和 MESFET 的电流-电压方程	(260)

思考题与习题	(260)
<b>第 6 章 其他常用半导体器件</b>	(262)
6.1 功率 MOS 场效应晶体管	(262)
6.1.1 功率 MOS 场效应晶体管的基本结构	(262)
6.1.2 功率 MOS 场效应晶体管电流-电压特性	(264)
6.1.3 功率 MOS 场效应晶体管的跨导和输出漏电导	(266)
6.1.4 功率 MOS 场效应晶体管的导通电阻	(267)
6.1.5 极限参数	(270)
6.2 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	(271)
6.2.1 基本结构与特性	(271)
6.2.2 工作原理与器件物理分析	(274)
6.2.3 栅极关断	(279)
6.2.4 擎住效应	(280)
6.2.5 频率与开关特性	(282)
6.3 半导体光学效应及光电二极管	(284)
6.3.1 半导体 PN 结光伏特性	(284)
6.3.2 光电导及光敏二极管	(287)
6.4 发光二极管	(288)
6.4.1 发光过程中的复合	(288)
6.4.2 发光二极管的制备与特性	(289)
6.5 半导体激光器	(291)
6.5.1 半导体激光器及其结构	(291)
6.5.2 半导体受激发光条件	(292)
思考题与习题	(295)
<b>附录</b>	(296)
<b>参考文献</b>	(297)

# 第 1 章 半导体物理基础

自然界物质有气态、液态、固态和等离子体态等几种形态。如果按照固体的导电能力（用电阻率 $\rho$ 或电导率 $\sigma$ 描述）不同，可以区分为导体、半导体和绝缘体，如表 1.1 所示。

表 1.1 导体、半导体和绝缘体的电阻率范围

材料	导体	半导体	绝缘体
电阻率 $\rho/\Omega\text{cm}$	$<10^{-3}$	$10^{-3}\sim 10^9$	$>10^9$

可见半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，此外半导体还具有一些重要特性，主要包括：①温度升高使半导体导电能力增强，电阻率下降。例如室温附近的纯硅（Si），温度每增加 8 °C，电阻率 $\rho$ 相应地降低 50%左右。②微量杂质含量可以显著改变半导体的导电能力。以纯硅中每 100 万个硅原子掺进一个 V 族杂质（比如磷）为例，这时硅的纯度仍高达 99.9999%，但电阻率 $\rho$ 在室温下却由大约 214 000  $\Omega\text{cm}$  降至 0.2  $\Omega\text{cm}$  以下。③适当波长的光照可以改变半导体的导电能力。如在绝缘衬底上制备的硫化镉（CdS）薄膜，无光照时的暗电阻为几十兆欧，当受光照后电阻值可以下降为几十千欧。此外，半导体的导电能力还随电场、磁场等的作用而改变。

概括起来，半导体的性质容易受到温度、光照、磁场、电场和微量杂质含量等因素的影响而发生改变，而正是半导体的这些特性使其获得了广泛的应用。目前，硅（Si）和砷化镓（GaAs）是半导体器件和集成电路生产中使用最多的半导体材料。

作为后面学习各种半导体器件原理的基础，本章以元素半导体硅（Si）和锗（Ge）为研究对象，系统地介绍了半导体物理基础方面的相关知识。在简单介绍了半导体的晶体结构和缺陷、定义了晶向和晶面之后，讨论了半导体中的电子状态与能带结构，介绍了杂质半导体及其杂质能级。在半导体中载流子统计理论的基础上分析了载流子的浓度，讨论了非平衡载流子的产生与复合。对半导体中载流子的漂移运动和半导体的导电性进行了讨论，介绍了载流子的扩散运动，建立了连续性方程。本章的最后简要地介绍了半导体表面的相关知识。

## 1.1 半导体晶体结构和缺陷

### 1.1.1 半导体的晶体结构

固体有晶体和非晶体之分。晶体具有一定的外形、固定的熔点，更重要的是组成晶体的原子或离子在至少是微米量级的较大范围内都是按一定的方式规则排列而成，称为长程有序。晶体又分为单晶与多晶，单晶是指整个晶体主要由原子或离子的一种规则排列方式所贯穿，常用的半导体材料锗（Ge）、硅（Si）、砷化镓（GaAs）都是单晶。Si、Ge 称为元素半导体，GaAs 称为化合物半导体。多晶则由很多小晶粒杂乱地堆积而成。除晶态半导体外，尚有非晶态半导体，如非晶态硅、非晶态锗等，它们没有规则的外形，也没有固定熔点，内部结构不存在长程有序，只是在若干原子间距内的较小范围内存在结构上的有序排列，称为短程有序。二维情形下的非晶、多晶和单晶示于图 1.1 中。

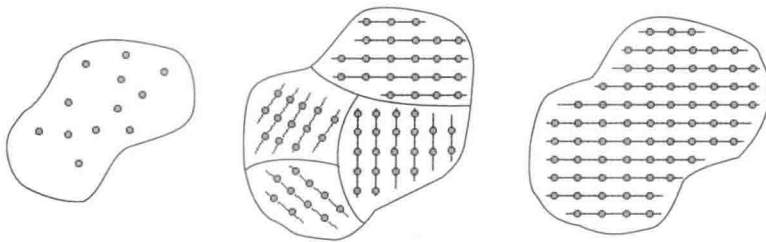


图 1.1 非晶、多晶和单晶示意图

对于单晶 Si 或 Ge，它们分别由同一种原子组成，通过两个原子间共有一对自旋相反配对的价电子把原子结合成晶体。这种依靠共有自旋相反配对的价电子所形成的原子间的结合力，称为共价键。由共价键结合而成的晶体称为共价晶体，Si、Ge 都是典型的共价晶体。

共价键具有饱和性和方向性。饱和性指每个原子与周围原子之间的共价键数目有一定的限制。Si、Ge 等 IV 族元素有 4 个未配对的价电子，每个原子只能与周围 4 个原子共价键合，使每个原子的最外层都成为 8 个电子的闭合壳层。因此，共价晶体的配位数（即晶体中一个原子最邻近的原子数）只能是 4。方向性是指原子间形成共价键时，电子云的重叠在空间一定方向上具有最高密度，这个方向就是共价键方向。共价键方向是四面体对称的，即共价键是从正四面体中心原子出发指向它的四个顶角原子，共价键之间的夹角为  $109^{\circ}28'$ ，这种正四面体称为共价四面体，见图 1.2。图中原子间的两条连线表示共有一对价电子，两条线的方向表示共价键方向。共价四面体中如果把原子粗略看成圆球并且最邻近的原子彼此相切，圆球半径就称为共价四面体半径。

单纯依靠图 1.2 那样的一个四面体还不能表示出各个四面体之间的相互关系，为充分展示共价晶体的结构特点，图 1.3 画出了由四个共价四面体所组成的一个 Si、Ge 晶体结构的晶胞，统称为金刚石结构晶胞，它是一个正立方体，整个 Si、Ge 晶体就是由这样的晶胞周期性重复排列而成的。金刚石结构晶胞也可以看作两个面心立方沿空间对角线相互平移  $1/4$  对角线长度套构而成。金刚石结构晶胞中有 8 个原子，正立方体的边长称为晶格常数，用  $a$  表示。

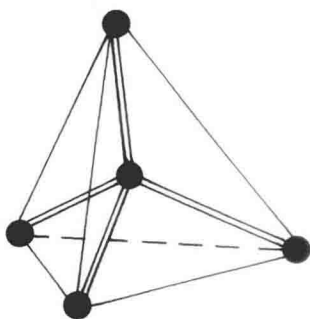


图 1.2 共价四面体

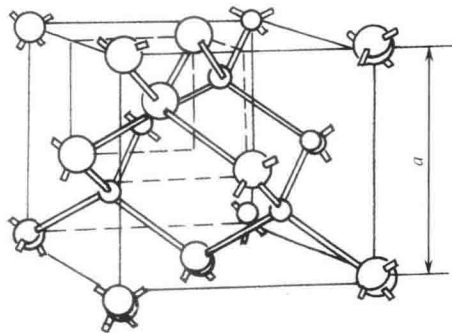


图 1.3 金刚石结构的晶胞

### 1.1.2 晶体的晶向与晶面

晶体由晶胞周期性重复排列构成，整个晶体就像网格，称为晶格。组成晶体的原子或离子的重心位置称为格点，格点的总体称为点阵。对 Si 和 Ge 这种具有金刚石结构的立方晶系，通常取某个格点为原点，再取立方晶胞的三个互相垂直的边  $OA, OB, OC$  为三个坐标轴，称为晶轴，见图 1.4。图中  $OA, OB, OC$  长度就是晶格常数  $a$ ，一般以  $a$  作为晶轴的长度单

位。 $OA, OB, OC$ 称为晶胞的三个基矢，分别以 $a, b, c$ 表示。

通过晶格中任意两格点可以作一条直线，而且通过其他格点还可以作出很多条与它彼此平行的直线，而晶格中的所有格点全部位于这一系列相互平行的直线上，这些直线系称为晶列。图 1.5 画出了两种不同的晶列。晶列的取向称为晶向，为表示晶向，从一个格点  $O$  沿某个晶向到另一格点  $P$  作位移矢量  $R$ ，如图 1.6 所示，则

$$R = l_1 a + l_2 b + l_3 c$$

若  $l_1:l_2:l_3$  不是互质的，通过  $l_1:l_2:l_3 = m:n:p$  化为互质整数， $mnp$  就称为晶列指数，写成  $[mnp]$ ，用来表示某个晶向，若  $mnp$  中有负数，负号写在该指数的上方， $[mnp]$  和  $[\bar{m} \bar{n} \bar{p}]$  表示正好相反的晶向。同类晶向记为  $\langle mnp \rangle$ ， $\langle 100 \rangle$  就代表了  $[100]$ 、 $[\bar{1}00]$ 、 $[010]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[001]$ 、 $[00\bar{1}]$  6 个同类晶向， $\langle 111 \rangle$  代表了立方晶胞所有空间对角线的 8 个晶向，而  $\langle 110 \rangle$  表示立方晶胞所有 12 个面对角线的晶向。

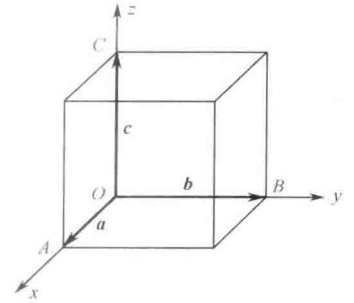


图 1.4 立方晶系的晶轴

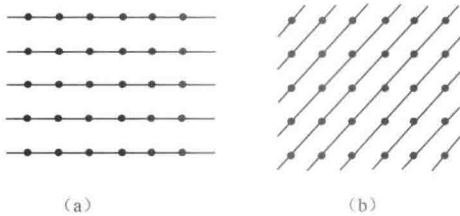


图 1.5 两种不同的晶列

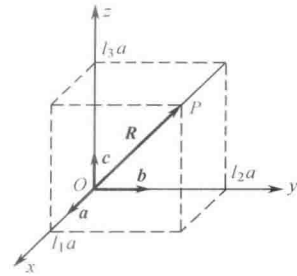


图 1.6 晶向的表示

晶格中的所有格点也可看成全部位于一系列相互平行等距的平面系上，这样的平面系称为晶面族，如图 1.7 所示。为表示不同的晶面，在三个晶轴上取某一晶面与三晶轴的截距  $r, s, t$ ，如图 1.8 所示。将晶面与三晶轴的截距  $r, s, t$  的倒数的互质整数  $h, k, l$ ，即  $(1/r):(1/s):(1/t) = h:k:l$ ，称为晶面指数或密勒指数，记作  $(hkl)$  并用来表示某一个晶面。截距为负时，在指数上方加一短横。如果晶面和某个晶轴平行，截距为  $\infty$ ，相应指数为零。同类型的晶面通常用  $\{hkl\}$  表示，如  $(100)$ 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(010)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(001)$ 、 $(00\bar{1})$  6 个同类型晶面用  $\{100\}$  表示。图 1.9 画出了立方晶系中的一些常用晶向和晶面，图中还表明在立方晶系中晶列指数和晶面指数相同的晶向和晶面之间是互相垂直的，如  $[100] \perp (100)$ 、 $[110] \perp (110)$ 、 $[111] \perp (111)$  等。

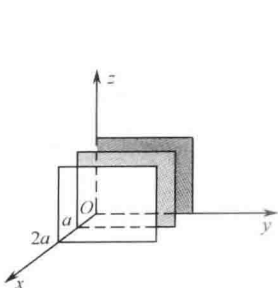


图 1.7 晶面族

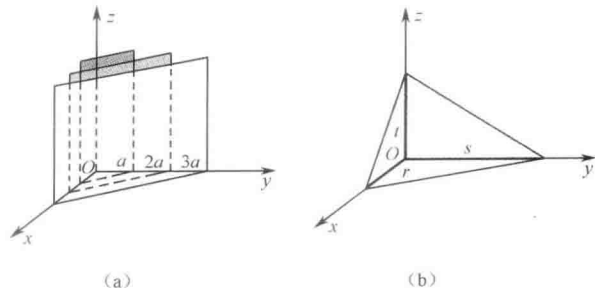


图 1.8 晶面的截距

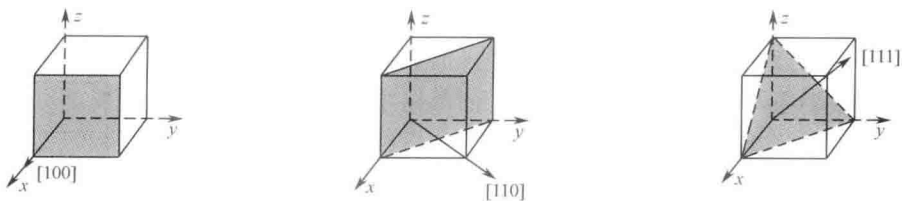


图 1.9 立方晶系的一些常用晶向和晶面

### 1.1.3 半导体中的缺陷

实际的半导体材料中存在各种晶体缺陷，它们对半导体材料的物理、化学性质起着显著的甚至是决定性的作用。这里简要介绍几种主要的晶体缺陷。

#### 1. 点缺陷

一定温度下，格点原子在平衡位置附近振动，其中某些原子能够获得较大的热运动能量，克服周围原子化学键束缚而挤入晶体原子间的空隙位置，形成间隙原子，原先所处的位置相应成为空位。例如硅中的硅间隙原子和空位，砷化镓中的镓空位和镓间隙原子或砷空位和砷间隙原子等，如图 1.10 所示。这种间隙原子和空位成对出现的缺陷称为弗仑克尔缺陷。由于原子挤入间隙位置需要较大的能量，通常是表面附近的原子 A 依靠热运动能量运动到外面新的一层格点位置上，而 A 处的空位由晶体内部原子逐次填充，从而在晶体内部形成空位，而表面则产生新原子层，如图 1.11 所示，晶体内部产生空位但没有间隙原子，这种缺陷称为肖特基缺陷。同理，表层原子运动到内部形成间隙原子称为反肖特基缺陷。

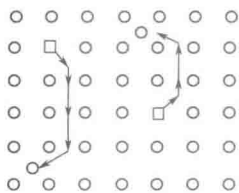


图 1.10 弗仑克尔缺陷

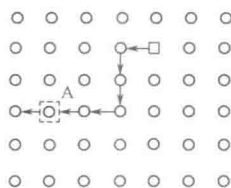


图 1.11 肖特基缺陷

弗仑克尔缺陷、肖特基缺陷和反肖特基缺陷统称点缺陷，它们依靠热运动不断地产生和消失着，在一定温度下达到动态平衡，使缺陷具有一定的平衡浓度值。虽然这三种点缺陷同时存在，但由于在 Si、Ge 中形成间隙原子一般需要较大的能量，所以肖特基缺陷存在的可能性远比弗仑克尔缺陷和反肖特基缺陷大，因此 Si、Ge 中主要的点缺陷是空位。

#### 2. 线缺陷

晶体中的另一种缺陷是位错，它是一种线缺陷。半导体单晶制备和器件生产的许多步骤都在高温下进行，因而在晶体中会产生一定的应力。在应力作用下晶体的一部分原子相对于另一部分原子会沿着某一晶面发生移动，如图 1.12 (a) 所示。这种相对移动称为滑移，在其上产生滑移的晶面称为滑移面，滑移的方向称为滑移向。实验表明滑移运动所需应力并不很大，因为参加滑移的所有原子并非整体同时进行相对移动，而是左端原子先发生移动推动相邻原子使其发生移动，然后再逐次推动右端的原子，最终是上下两部分原子整体相对滑移了一个原子间距  $b$ ，见图 1.12 (b)。这时虽然在晶体两侧表面产生小台阶，但由于内部原子都相对移动了一个原子间距，因此晶体内部原子相互排列位置并没有发生畸变。



在上述逐级滑移中会因为应力变小而使滑移中途中止,就出现了如图 1.13 (a) 所示的情况。

在应力作用下晶体上半部分相对于下半部分沿 ABCD 面发生滑移,开始时 BGHC 面上原子沿着 ABCD 晶面向右滑移一个原子间距,被推到 B'G'H'C'面上的原子位置,右面相邻的原子面作为滑移的前沿逐次向右蠕动。如果中途应力变小使滑移中止,滑移的最前端原子面 AEFD 左侧原子都完成了一个原子间距的移动,而右侧原子都没有移动,其结果是好像有一个多余的半晶面 AEFD 插在晶体中,如图 1.13 (b) 所示。在 AD 线周围晶格产生畸变,而距 AD 线较远处似乎没有影响,原子仍然规则排列,这种缺陷称为位错,它是一种发生在 AD 线附近的线缺陷,AD 线称为位错线。图 1.13 中滑移方向 BA 与位错线 AD 垂直,称为棱位错。因为它有一个多余的半晶面 AEFD 像刀一样插入晶体,也称刃形位错。棱位错产生了多余半晶面,在 Si、Ge 晶体中位错线 AD 上的每个原子周围只有三个原子与之构成共价键,还存在一个悬挂键,这些非饱和共价键可以接受或释放电子从而影响半导体器件的性能。

图 1.14 所示的称为螺旋位错的滑移是沿 BC 方向的,而原子移动沿 BA 方向传递,位错线 AD 和滑移方向平行。与刃形位错不同的是,这时晶体中与位错线 AD 垂直的晶面族不再是一个个平行面,而是相互连接、延续不断并形成一个整体的螺旋面。

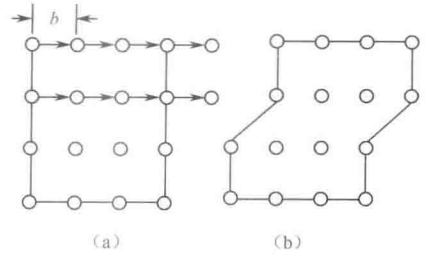


图 1.12 应力作用下晶体沿某一晶面的滑移

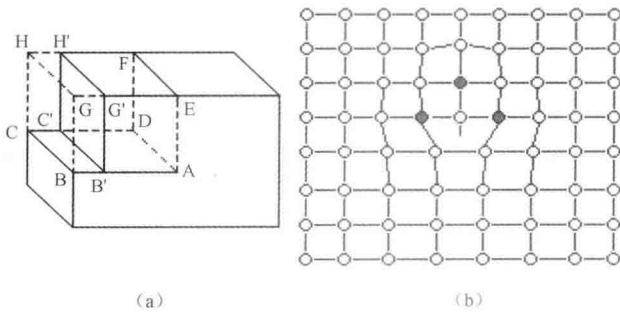


图 1.13 刃形位错

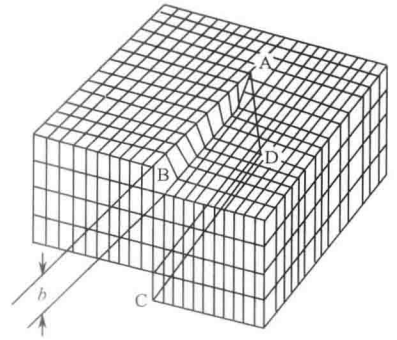


图 1.14 螺旋位错

半导体中往往包含很多彼此平行的位错线,它们一般从晶体一端沿伸到另一端,与表面相交。半导体中还存在因原子排列次序的错乱而形成的一种面缺陷。面缺陷主要包括小角晶界和堆垛层错,这里就不赘述了。

## 1.2 半导体的能带与杂质能级

### 1.2.1 半导体中电子共有化运动与能带

半导体中的电子能量状态和运动特点及其规律决定了半导体的性质容易受到外界温度、光照、电场、磁场和微量杂质含量的作用而发生变化。为便于说明半导体中的电子状态及其特点,首先回顾一下孤立原子中的电子状态和自由电子状态。