

GH

高等 学 校 规 划 教 材
工 科 电 子 类

SEMICONDUCTOR PHYSICS

半 导 体 物 理 学

Cu Zuyi Tian Lilin Fu Liwen

顾祖毅 田立林 富力文



電 子 工 業 出 版 社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONIC INDUSTRY

高等学校
工科电子类

规划教材

SEMICONDUCTOR PHYSICS

半导体物理学

顾祖毅 田立林 富力文
Gu Zuyi Tian Lilin Fu Liwen

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

(京)新登字 055 号

内 容 简 介

本书内容包括:半导体材料的主要类型、晶体结构和缺陷,半导体中的电子状态,平衡载流子浓度、过剩载流子及其复合,弱场下的载流子输运和热载流子效应,半导体与金属、绝缘体的接触,半导体的光学性质和光电效应,非晶态半导体等。每章后面均附有习题。

本书为高等学校工科类微电子学、微电子技术、半导体物理与器件等专业教材。它是为五年制专业本科生编写的,但亦可供四年制专业选用或参考。还可供有关专业本科生、研究生以及工程技术人员阅读参考。

Brief Introduction of the Book

This book is devoted to a detailed description of semiconductor physics, which consists of eleven chapters; Crystal structures and defects of semiconductor materials; Electronic states in semiconductor; Carrier concentration at thermal equilibrium; Carrier transport phenomena; Excess carrier and their recombination; p-n junction; Field effect of semiconductor surface and MOS physics; Metal-semiconductor contacts and heterojunction; Hot carriers and high field effect; Optical properties and photoelectric effects; and Amorphous semiconductors. Exercises are included at the end of each chapter.

This book is an elementary textbook for undergraduate students majoring in microelectronics, microelectronic technology, and semiconductor devices and physics. The treatment is intended for undergraduate students of five university years, and the book should be suitable for four years' ones as well. The graduate students and engineers in the field of semiconductors can also use the book as a reference.

半 导 体 物 理 学

顾祖毅 田立林 富力文

责任编辑:吴金生

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

电子工业出版社计算机排版室排版

北京科技大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:23.25 字数:595 千字

1995 年 4 月第一版 1995 年 4 月北京第一次印刷

印数:2000 册 定价:13.50 元

ISBN7-5053-2734-8/G·213

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

中国电子工业部教材办公室

AA292/01

前 言

本教材系按电子工业部工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由“电子材料与固体器件”教材编审委员会“半导体物理与器件”编审小组征稿并推荐出版。责任编委为李卫教授。

教材主编是清华大学顾祖毅,华中理工大学马稚尧担任主审。

随着半导体器件、集成电路和半导体物理学本身的飞速发展,新的物理现象、效应和理论概念不断涌现,对基本理论的理解也在不断地深化。因而,在教材中及时地、恰当地反映半导体物理学的新进展、充实必要的新内容,就成了我们首先努力的一个方向。从半导体材料来说,硅是目前最常用的,对它的特性研究最为深入,因此,在介绍半导体物理效应和材料特性时,一般都常常以它为典型。但是,近来一些化合物半导体和混合晶体已得到了很好的应用,并展现了广阔的前景。因而本书在重点以硅作为主要对象的同时,尽量介绍了有关这些方面的内容。近来,非晶态半导体在理论上或应用上都取得了很大的进展,作为一整类性能独特的半导体材料,已受到人们广泛的重视。因此,本书在主要介绍晶态半导体基本理论概念和性质的同时,专门在第 11 章对非晶态半导体作了较为系统的介绍。书中还在第 9 章集中对强电场下的热载流子效应作了说明,这是由于集成电路的集成度越来越高,器件尺寸越来越小,器件内部的电场大大增强,载流子的强场效应已很突出的需要。此外,像表面结构的弛豫和重构、表面量子化、半导体超晶格和多量子阱等概念,书中也尽量作了必要的介绍。与此同时,对载流子的平衡统计分布、同质 p-n 结等章节的内容则适当作了精减,以使整个教材篇幅不致增加太多。

在教材体系上,“半导体的晶体结构和缺陷”一章是在固体物理的基础上具体介绍常用半导体的晶格结构特点和缺陷种类与特性。将它放在各章之前,一方面是考虑到现今的微电子学、微电子技术等专业都没有开设半导体材料课;另一方面,也使在第 2 章介绍半导体中的电子状态时有了晶体结构的基础。在弱场下的载流子输运(第 4 章)中,包含了温度场下的输运。这是因为在电场、磁场和温度场的作用下,决定载流子迁移能力的内在因素实质上是同一的,将它们放在一章内讲将对载流子输运现象的本质和有关电、磁、热以及电磁、热磁、电热等效应有更深入、全面的理解。同时,这么安排也节省了篇幅。此外,在相关的章节中,还编入了一些物理参数的基本测试方法与简要的分析。其目的是为了提高学生分析和解决实际问题的能力并能重视理论与实践的结合。

对于基本概念和理论的阐述,本书在力求严谨、准确的同时,尽量应用简单的模型来定性地说明,数学处理也尽量简化,以使全书能够深入浅出,便于学生自学和阅读。

本书是在清华大学微电子学专业五年制所用教材讲义的基础上编成的。预计的总授课学时为 112 学时,在最近的实践中,我们实际上用 96 学时便基本上授完了全部内容。在对应用物理系和材料科学系有关专业的教学实践中,用 64 学时,讲授了他们需要的基本内容。这些教学实践表明,这虽是为五年制本科生编写的教材,但对微电子学、微电子技术、半导体物理与器件等专业的四年制本科生也同样可用作教材或主要参考书。也可供有关专业本科生、研究生及工程技术人员参考阅读。

尽管本书是由我们三人编写完成的,但实际上它应看成是我们教研组多年来半导体物理

课的教学实践和历次编写的讲义成果的总结。在 50 年代末和 60 年代初,我们的老师李志坚教授最早讲授这门课,并编写了一本很好的讲义。这本讲义实际成了我们后来历次编写讲义的基础和学习的范本。后来,到 70 年代末和 80 年代初,黄培中、顾祖毅、王天爵、富力文、陈培毅等编写过一本新的讲义。在教学实践中,又经顾祖毅二次补充、修订。到 91~92 年间,由我们三人重又编成了作为本书基础的新讲义。本书是由田立林编写第七、十两章,富力文写了第三、四、六三章的初稿和编集了各章的习题,其余各章的编写和全书的统编均由顾祖毅完成。在本书出版之际,我们要特别感谢李志坚教授、陈天鑫教授、黄培中教授和王天爵教授,在教材的编写过程中,曾得到他们热情的指导与多方面的帮助。马稚尧和参加书稿评审的天津大学郭维廉教授均对本书提出过许多宝贵意见,在此也表示诚挚的感谢。我们还要感谢郭新民、宋文忠、梁淑英和董梅珠等同志,他们为书稿的打印、制图等工作付出了巨大的辛劳。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望各位专家和广大读者批评指正。

编者

1994 年 10 月于清华园

符号表

a	晶格常数;加速度	E_c	导带底能量;导带迁移率边
a_0	氢原子基态玻尔半径	E_{c_n}	n型半导体导带底能量
a_B	杂质原子基态玻尔半径	E_{c_p}	p型半导体导带底能量
\mathbf{a}	基矢;加速度	E_v	价带顶能量;价带迁移率边
A	面积;理查逊常数	E_{v_n}	n型半导体价带顶能量
A^*	有效理查逊常数	E_{v_p}	p型半导体价带顶能量
b	迁移率比	E_A	受主能级
\mathbf{b}	滑移矢	E_D	施主能级
B	磁感应强度	E_r	复合中心能级
\mathbf{B}	磁感应强度	E_t	陷阱能级
c	真空光速	\mathcal{E}	电场强度
C	电容	\mathcal{E}	电场强度
C_D	扩散电容	\mathcal{E}_T	阈值电场
C_T	势垒电容	\mathcal{E}_C	形变势常数
C_i	绝缘层电容;氧化层电容	f	分布函数;分布几率;频率
C_s	表面空间电荷层电容	f_0	平衡分布函数
C_u	界面态电容	f_n	电子分布函数
C_{FB}	平带电容	f_p	空穴分布函数
C_v	单位体积定容热容量	f_i	离子性
d	原子间距;隧道长度;厚度	F	力
d_i	绝缘层厚度;氧化层厚度	\mathbf{F}	力
d_{sc}	表面空间电荷层宽度	g	态密度;产生系数;光电导增益
D	扩散系数	g_c	导带底态密度
D_n	电子扩散系数	g_v	价带顶态密度
D_p	空穴扩散系数	g_n	电子产生系数
D^*	双极扩散系数	g_p	空穴产生系数
E	能量	g_{an}	俄歇产生系数
E_F	费米能级	g_{ap}	俄歇产生系数
E_{F_n}	n型半导体费米能级	g_A	受主基态简并度
E_{F_p}	p型半导体费米能级	g_D	施主基态简并度
E_F^{\uparrow}	电子准费米能级	g_L	增益系数
E_F^{\downarrow}	空穴准费米能级	G	产生率;电导
E_i	本征费米能级;禁带中线	G_0	热平衡产生率
E_g	禁带宽度	h	普朗克常数
E_{opt}	光学禁带宽度		

h	普朗克常数 $h = \frac{h}{2\pi}$	m_{tp}	空穴态密度有效质量
I	电流强度; 光强	m_{en}	电子电导率有效质量
I_F	正向电流	m_{ep}	空穴电导率有效质量
I_R	反向电流	m_w^{\wedge}	电子回旋共振有效质量
I_L	光生电流	m_p^{\wedge}	空穴回旋共振有效质量
I_{sc}	短路电流	m_l	纵有效质量
I_{scr}	光磁短路电流	m_t	横有效质量
j	电流密度	m_{ph}	重空穴有效质量
\mathbf{j}	电流密度	m_{pt}	轻空穴有效质量
j_n	电子电流密度	M	雪崩倍增因子
j_p	空穴电流密度	n	电子浓度; 相对折射率
j_D	扩散电流密度	n_0	热平衡电子浓度
j_g	势垒区产生电流密度	n_i	本征载流子浓度
j_r	势垒区复合电流密度	n_D	未离化施主浓度
j_s	反向饱和电流密度	n_A	离化受主浓度
J	粒子流密度	\bar{n}_q	平均声子数
\mathbf{J}	粒子流密度	\mathbf{n}	单位法线矢量
J_n	电子流密度	N	原子密度; 原胞数; 复数折射率
J_p	空穴流密度	N_c	导带底等效态密度
k	电子波数	N_v	价带顶等效态密度
\mathbf{k}	电子波矢	N_i	自间隙原子浓度
k_l	光子波数	N_f	固定电荷面密度
\mathbf{k}_l	光子波矢	N_m	可动电荷面密度
K_B	玻尔兹曼常数	N_d	界面态密度
\mathbf{K}_u	晶体倒格矢	N_s	肖特基缺陷浓度; 悬挂键面密度
l	长度; 平均自由程	N_r	复合中心浓度
L	长度; 罗仑兹常数; 沟道长度	N_t	陷阱中心浓度
L_D	德拜长度	N_D	施主杂质浓度
L_{D1}	本征德拜长度	N_A	受主杂质浓度
L_n	电子扩散长度	p	空穴浓度
L_p	空穴扩散长度	p_0	热平衡空穴浓度
$L(\mathcal{E})$	牵引长度	p_D	离化施主浓度
L_s	势阱宽度	p_A	未离化受主浓度
m_0	自由电子质量	P	压力; 散射几率; 隧道穿透几率; 跳跃几率; 爱廷豪森系数
m^*	有效质量	q	电子电荷; 格波波数
m_n	电子有效质量	\mathbf{q}	格波波矢
m_p	空穴有效质量	Q	电荷量; 热量
m_r	约化质量	Q_f	固定电荷
m_{dn}	电子态密度有效质量	Q_m	可动电荷

Q_{it} 界面态电荷
 Q_{ot} 氧化层陷阱电荷
 Q_{sc} 表面空间电荷
 Q_N 能斯脱系数
 r 位移矢量
 r 半径;距离;复合系数;直接复合复合系数
 r_n 间接复合电子俘获系数
 r_p 间接复合空穴俘获系数
 r_{an} 俄歇复合系数(二电子一空穴)
 r_{ap} 俄歇复合系数(二空穴一电子)
 r_H 霍尔因子
 R 复合率;反射系数;电阻
 R_c 接触电阻
 R_H 霍尔系数
 R_0 无磁场的电阻;热平衡复合率
 R_B 有磁场的电阻
 S 表面复合速度;里纪-勒杜克系数
 t 时间
 t_e 电子渡越时间
 t_p 空穴渡越时间
 \bar{t} 平均自由时间
 T 温度;透射系数
 T_e 电子温度
 T_L 晶格温度
 u 弹性波波速
 u_k 布洛赫波的周期性调制函数
 u_s 声子速度
 U 位能;内能;库仑相互作用能;净复合率
 U_n 电子净俘获率
 U_p 空穴净俘获率
 U_s 稳态净俘获率;表面复合净复合率
 v 速度
 v 速度
 v_g 群速度
 v_{ph} 相速度
 v_i 扩散速度
 v_D 漂移速度
 V 空位;体积;电压;电势差
 V_D 内建电势差;接触电势差

V_F 费米势;正向偏压
 V_s 表面势
 V_{bc} 金属-半导体接触电势差
 V_R 反向偏压
 V_B 击穿电压
 V_g 栅电压
 V_{FB} 平带电压
 V_T 阈值电压
 V_{OC} 开路电压
 V_{OCr} 光磁开路电压
 w 厚度
 W 厚度;能量;激活能;功函数
 W_m 金属功函数
 W_s 半导体功函数
 W 热流密度;能流密度
 x_j 结深
 x_D 耗尽层宽度(空间电荷层宽度)
 Z 配位数
 α 吸收系数;电离率;电压扫描速率;温差电动势率;杂质浓度梯度
 α_j $x=x_j$ 处的杂质浓度梯度
 β 量子产额
 ϵ_0 真空介电常数
 ϵ_r 介质的相对介电常数
 ϵ_s SiO_2 的相对介电常数;绝缘介质的相对介电常数
 ϵ_s 半导体的相对介电常数
 η 量子效率
 θ 角度
 θ_H 霍尔角
 Θ 温差电动势
 κ 消光系数;热导率
 λ 波长
 μ_n 电子迁移率
 μ_p 空穴迁移率
 μ_H 霍尔迁移率
 μ^* 双极迁移率
 ν 频率
 π_{ab} 珀尔帖系数
 ρ 电荷密度;电阻率

ρ_0	零磁场电阻率	$q\Phi_m$	金属面临的势垒高度
ρ_B	非零磁场电阻率	χ	电子亲合能
σ	电导率	ψ	电子波函数
σ_n	对电子的俘获截面	φ	孤立原子中电子波函数
σ_p	对空穴的俘获截面	ω	角频率
τ	弛豫时间; 时间常数; 寿命	Ω	立体角; 晶格原胞体积
τ_E	能量弛豫时间		

目 录

出版说明	
前言	
符号表	
第一章 半导体的晶体结构和缺陷	(1)
§ 1.1 半导体的基本特性与常见半导体材料	(1)
§ 1.2 半导体的晶体结构	(4)
§ 1.3 半导体中的晶格缺陷	(11)
§ 1.4 表面结构的弛豫和重构	(23)
参考文献	(27)
习题	(28)
第二章 半导体中的电子状态	(31)
§ 2.1 半导体中的电子状态和能带	(31)
§ 2.2 外力作用下电子的运动	(36)
§ 2.3 金属、半导体和绝缘体	(40)
§ 2.4 空穴	(42)
§ 2.5 常见半导体的能带结构	(43)
§ 2.6 杂质和缺陷能级	(55)
§ 2.7 重掺杂半导体	(66)
参考文献	(67)
习题	(69)
第三章 平衡载流子浓度	(71)
§ 3.1 态密度	(71)
§ 3.2 费米分布和玻尔兹曼分布	(72)
§ 3.3 非简并半导体的载流子浓度	(74)
§ 3.4 简并半导体	(84)
附录 3.1	(86)
参考文献	(88)
习题	(88)
第四章 弱场下的载流子输运	(89)
§ 4.1 载流子的散射和迁移率	(89)
§ 4.2 电导、霍尔效应和磁阻	(99)
§ 4.3 半导体的热电现象	(106)
§ 4.4 输运效应的统计计算	(112)
附录 4.1	(123)
参考文献	(124)
习题	(125)
第五章 过剩载流子及其复合	(127)
§ 5.1 过剩载流子及其寿命	(127)

§ 5.2 非平衡载流子的运动和空间分布	(131)
§ 5.3 复合过程与寿命的计算	(141)
§ 5.4 主要复合机理和实验结果	(146)
§ 5.5 陷阱效应	(152)
参考文献	(154)
习题	(155)
第六章 同质 p-n 结	(157)
§ 6.1 热平衡条件下的 p-n 结	(157)
§ 6.2 p-n 结直流伏安特性	(163)
§ 6.3 p-n 结电容	(173)
§ 6.4 p-n 结击穿	(180)
§ 6.5 隧道 p-n 结	(183)
参考文献	(185)
习题	(186)
第七章 表面电场效应与 MOS 物理	(189)
§ 7.1 半导体表面和硅-二氧化硅界面	(189)
§ 7.2 表面电场效应	(193)
§ 7.3 表面空间电荷区的理论计算	(200)
§ 7.4 实际 MOS 结构的 C-V 特性	(207)
§ 7.5 表面复合	(213)
§ 7.6 表面电导和沟道迁移率	(215)
§ 7.7 表面量子化	(219)
§ 7.8 半导体表面和界面参数的测量	(221)
参考文献	(227)
习题	(227)
第八章 金属-半导体接触和半导体异质结	(229)
§ 8.1 金属-半导体接触	(229)
§ 8.2 半导体异质结	(240)
§ 8.3 半导体超晶格和多量子阱	(249)
参考文献	(252)
习题	(253)
第九章 热载流子效应	(255)
§ 9.1 强电场下的非线性电导	(255)
§ 9.2 电子在等效能谷间的再分布	(263)
§ 9.3 非等效能谷间的电子转移效应	(265)
§ 9.4 热载流子的扩散	(270)
§ 9.5 反型层中的热载流子	(272)
参考文献	(273)
习题	(273)
第十章 半导体的光学性质和光电效应	(275)
§ 10.1 半导体的光学常数	(275)
§ 10.2 半导体中的光吸收	(279)
§ 10.3 半导体中的光电导	(289)
§ 10.4 半导体中的光发射	(298)

§ 10.5 半导体激光	(305)
§ 10.6 光生伏特效应和光磁效应	(311)
附录 10.1	(315)
参考文献	(318)
习题	(319)
第十一章 非晶态半导体	(321)
§ 11.1 非晶态半导体的结构特点	(321)
§ 11.2 非晶态半导体中的电子状态和能带	(326)
§ 11.3 非晶态半导体的电学性质	(337)
§ 11.4 非晶态半导体的光学性质	(346)
参考文献	(354)
习题	(356)
附表 1 基本物理常数	(357)
附表 2 半导体 Ge、Si、GaAs 的性质(300K)	(357)

第一章 半导体的晶体结构和缺陷

在读者具有了固体物理学的一般知识以后,本章将着重说明常见半导体的晶体结构及其缺陷的特点,以作为全书以后各章的基础。

§ 1.1 半导体的基本特性与常见半导体材料^[1]

随着科学技术的发展,广泛用于微电子学和光电子学中的半导体材料在电子材料中的地位越来越重要。除了半导体二极管、三极管和集成电路块以外,还可以利用半导体材料制成整流器、太阳电池、激光器、发光器件以及各种敏感器件(如光敏、色敏、气敏、热敏、压敏等)和种类繁多的特殊用途电子元器件。半导体作为一类材料之所以获得如此广泛的应用,是因为它具有与金属和绝缘体不同的一些独特性质。在电学上,概括起来主要表现在如下几个方面:

(1)室温下电阻率大约在 $10^{-3} \sim 10^6$ 欧姆·厘米($\Omega \cdot \text{cm}$)范围内,介于金属和绝缘体之间(一个良好的金属导体室温下电阻率具有 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 数量级,典型的绝缘体为 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 数量级);

(2)纯净的半导体具有负的电阻温度系数,即它们的电阻率一般随温度的上升而下降,这与金属相反;

(3)与金属相比通常具有较高的温差电动势率,而且温差电动势率可为正或为负,而金属的温差电动势率总是负的;

(4)与适当金属形成接触或做成 p-n 结后,电流与电压呈非线性关系,可以有整流效应;

(5)具有光敏性,用适当波长的光照射以后,材料的电阻率会发生变化,即产生所谓光电导;

(6)与一般金属导体的载流子是自由电子的情况不一样,半导体中存在着电子和空穴(荷正电粒子)两种载流子。

此外,在半导体中杂质的存在对材料的电阻率会产生很大的影响。例如,对常用半导体材料硅,室温下纯净硅的电阻率为 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,若在其中掺入百万分之一的砷,就可使材料电阻率下降到大约百万分之一。而且由于杂质的存在,还可使在一定的温度范围内呈现正的电阻温度系数。

上述的这些特性使半导体有别于金属和绝缘体而自归一类。不过,需要指出,半导体与金属和绝缘体并不完全是按上述特性来区分的,实际上它们之间往往并不存在严格的界限。例如,红磷(磷的正常形态是黄磷,它的一种同素异形体称为红磷)的电阻率很高,在绝缘体范围,但它具有光电导效应,可以算是半导体材料。还有一些材料,在它的纯度很高时属于绝缘体范围,而当加入适量的杂质后便可看成是半导体。再有一些半导体材料,在掺杂浓度很高时,往往具有与金属类似的性质,等等。

半导体材料的种类是很繁多的,在此无法一一列举。表 1-1 为周期表的一部分,其中粗线框内的元素已发现具有半导体性质。这种由单一元素的原子组成的材料称为元素半导体。表中每一元素符号下的数值,为该元素的负电性。不带括号的数值是按泡林(Pauling)的尺度^[2]得

到的,括号中的数值是由菲利普(Phillips)尺度^[3]得到的,它们之间的差别是后者考虑了价电子的屏蔽作用。第二行是该元素半导体的大致禁带宽度,单位是电子伏(eV)。大家知道,在周期表中,同一周期内由左向右金属性减弱,非金属性增强;在同一族中由上往下金属性增强。这里呈现半导体性质的一些元素,在周期表中是位于金属性与非金属性都不是很明显的地方。

表 1-1 元素半导体及其原子的负电性

Li 1.00	Be 1.50	B 2.00 1.1	C 2.50 5.7	N 3.00	O 3.50	F 4.00
Na 0.9(0.72)	Mg 1.2(0.95)	Al 1.5(1.18)	Si 1.8(1.41) 1.1	P 2.1(1.64) 1.5	S 2.5(1.87) 2.5	Cl 3.0(2.10)
Cu 1.9(0.79)	Zn 1.6(0.91)	Ga 1.6(1.13)	Ge 1.8(1.35) 0.70	As 2.0(1.57) 1.2	Se 2.4(1.79) 1.7	Br 2.8(2.01)
Ag 1.9(0.57)	Cd 1.7(0.83)	In 1.7(0.99)	Sn 1.8(1.15) 0	Sb 1.9(1.31) 0.12	Te 2.1(1.47) 0.36	I 2.5(1.63) 1.25
Au 2.4(0.64)	Hg 1.9(0.79)	Tl 1.8(0.94)	Pb 1.8(1.09)	Bi 1.9(1.24)		

Ge 和 Si 在周期表中属于第 IV 族,是典型的元素半导体。目前它们的制备工艺最成熟,使用也最广。在这两者当中,大多数第一代固态电子器件(例如晶体管)是用 Ge 制造的,但现在差不多已完全被 Si 取代。特别在微电子学领域,绝大多数集成电路都是用 Si 做衬底制造的。不过由于 Ge 的熔点(937℃)比 Si 的(1420℃)低,它更易于被加工和提纯,在基本物理研究中还常常使用。C 的一种结构形式是金刚石(另一种是石墨),纯净的金刚石是典型的绝缘体,但在某些情况下,由于杂质的存在使它具有半导体性质。Sn 在低温下才稳定,13℃以上是金属性的白锡,在 13℃以下称灰锡(又称 α -Sn)。过去一般认为 α -Sn 是禁带宽度大约为 0.08eV 的半导体,现在进一步的实验结果表明 α -Sn 是禁带宽度为零的半金属^[4,5]。VI 族元素 Se 和 Te 也曾受到重视。Te 在热电方面有应用。Se 在 30 年代就用来做整流器了,在光电方面也有应用。不过,Se 的纯化非常困难,因为区熔提纯方法对它无效。B 也表现出某些半导体性质,但并未详细研究过。其它元素(如 S、P 和 I)的同素异形体可具有半导体性质,但对其性质还了解甚少。

在二元化合物半导体中,III-V 族(即 $A_{III}B_V$)和 II-VI 族($A_{II}B_{VI}$)化合物半导体得到了突出的发展。由 Al、Ga、In 和 P、As、Sb 可组成九种化合物,其中对 InSb、InP、InAs、和 GaAs、GaP 已进行了比较深入的研究,它们在制做发光器件、半导体激光器、高速晶体管和微波功率管等方面都很有前途。在超大规模集成电路(VLSI)中,用 GaAs 作衬底材料在提高集成电路的速度与降低功耗等方面比 Si 要好。由 Zn、Cd、Hg 和 S、Se、Te 组成的化合物半导体中,目前应用较多的是 ZnS、CdS、CdTe 和 HgTe 等,它们主要用在制做光敏电阻、光探测器等方面。CdS 还是用于研究电声效应、制做电声器件的主要材料。不过,对于上述化合物半导体,因为它们都是由两种不同元素的原子组成的,目前在材料制备上还有许多困难。其中主要是难以获得严格的化学计量比的组分,且提纯也较困难。

Pb 的 S 族化合物 PbS、PbSe 和 PbTe 也是重要的半导体材料。由于它们的禁带宽度较窄，具有显著的红外光电导，可以制做红外探测器，是人们非常感兴趣的红外光电导材料。

Bi 的 S 族化合物也是半导体材料，如 Bi_2Te_3 作为一种热电材料亦受到了重视。

许多金属氧化物具有半导体特性，通常称为氧化物半导体。金属氧化物半导体的禁带宽度大，因而它的耐温特性好。目前，它已广泛用于半导体陶瓷工业。此外，象 Cu_2O 曾在早期的整流器中被应用， ZnO 是良好的压电材料并可用来制造激光器，等等。

除了上述二元化合物以外，还发现有更复杂的三元甚至四元化合物半导体存在。例如，属于黄铜矿的 CuFeS_2 具有整流特性。与此类似，发现 CuInTe_2 、 CuInSe_2 和 CuAlTe_2 这几种化合物也都具有明显的整流特性。此外，人们还推断， $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ 型的四元化合物（黄锡矿）也应具有半导体特性。但是，目前对多元化合物的研究进展并不大，这主要是由于制备和提纯这些化合物非常困难，有些材料甚至连单晶的生长都很难控制。不过，由于这类化合物品种极为繁多，料想符合技术上需要的一些化合物总是能够在它们中找到的，因此对发展多元化合物半导体的兴趣仍在与日俱增。

近来，两种结构相同的半导体组成的混合晶体〔例如两种 III-V 族化合物按一定比例组成的 $x\text{A}_1\text{C}_v + (1-x)\text{B}_1\text{C}_v$ 或两种 II-VI 族化合物组成的 $x\text{A}_1\text{C}_w + (1-x)\text{B}_1\text{C}_w$ 三元系混合晶体 $\text{A}_2\text{B}_{1-x}\text{C}$ 〕得到了广泛的重视和积极的利用〔特别是在异质结和超晶格结构（III-V 族系统）以及远红外探测器（II-VI 族系统）的应用中〕。因为这种混合晶体材料可以通过选取不同的配比 x ，来调节并达到需要的物理参量（如禁带宽度、折射率等），这样，人们便有可能根据需要设计具有某些电学和光学特性的材料以满足器件的需要，从而为半导体的应用开辟了一个更为广阔的前景。

表 1-2 主要半导体器件及其可选用的材料

器件应用领域	常用和有前途的半导体	主要理由
超大规模集成电路 (VLSI)	Si	E_g 、 μ_n 、 μ_p 合适，Si/SiO ₂ 界面态少，工艺成熟，热导率高
超高速集成电路 (VHSI) 和 高速晶体管	GaAs, GaAs/AlGaAs 异质结, InP	μ_n 大, 电子饱和漂移速度 v_{sat} 大
耿氏效应器件	GaAs, InP, CdTe	合适的电子能带结构
激光器	GaAs/AlGaAs, AlInAs/GaInAs 异质结, GaAs _{1-x} P _x , ZnS, ZnO, CdS, CdTe, CdSe, CdS _x Se _{1-x}	直接禁带, E_g 合适
发光二极管(LED)	GaP, GaAs _{1-x} P _x	合适的 E_g , 量子产额高
红外探测器	InSb, Hg _{1-x} Cd _x Te, PbS, PbSe, PbSe _{1-x} Te _x	E_g 合适, μ_n 或 μ_p 大, 噪声低
霍尔(Hall)器件	InSb, InAs, HgTe, HgSe	μ_n 高
压电、声电器件	CdS, ZnO, Si	各向异性强, 强压电效应
热电器件	Bi ₂ Te ₃ , PbS, InAs _{1-x} P _x , GaAs _{1-x} Sb _x	热电效应大, 工作温度合适, 热导率大
太阳电池	Si, GaAs, 非晶 Si(α -Si:H)	E_g 合适, 成本低

表 1-2 列出了一些半导体器件所用的半导体材料及其被选用的主要理由。应该指出的是,某种半导体是否能得到利用,除了这一材料应能满足特定器件的性能要求外,还要求在实际加工技术上的可行性,有时还要考虑与其他工艺技术的兼容。

除了上述无机物质以外,很多有机物质也表现出了半导体的特性(称为有机半导体)。蒽是一种典型的有机半导体。但由于有机化合物的纯度很难达到无机物质半导体所达到的纯度标准,而且也难以制得体积较大的优良晶体,因此这些材料的研究工作受到了一定的阻碍。有机半导体目前还未能得到应用。

最后,还要说明一点的是,在半导体器件和集成电路的制造中,通常采用的都是人工制备的单晶体。近一、二十年来,非晶态半导体不论在理论上或是在应用上都取得了很大的进展,在一些方面已达到实用的程度,受到了人们极大的重视。虽然如此,但到目前为止,无论是在理论研究的深度上还是技术应用的广度上晶态半导体仍处于主导地位。因此,本书所介绍的内容基本上还是针对晶态半导体的,关于非晶态半导体的知识则放在最后一章中专门介绍。

§ 1.2 半导体的晶体结构^[6]

1.2.1 常见半导体的结构类型与共价四面体

在种类繁多的半导体材料中,其结构形式也是多种多样的。图 1.1 示意地给出了一些半导体材料可能形成的结构类型。这里用实线隔开了配置不同(配位数不同)的结构,而用虚线隔开配置类似(配位数相同)的结构。界线穿过正方形时,表示在标准温度和压力(STP)下该材料可取相应两种结构中的任一种,或者在偏离 STP 时可由其中的一种结构转变为另一种结构。而某种结构占有的正方形面积越大,则表示在 STP 下,越倾向于取此种结构形式。图中各符号的意思分别是:D,金刚石结构;Z,闪锌矿结构;W,纤锌矿结构;NaCl,氯化钠(岩盐)结构;Cinn,硫化汞矿结构;G,石墨或类石墨结构。其中最主要的是四种简单的结构:金刚石结构、闪锌矿结构、纤锌矿结构和氯化钠结构。下面将主要讨论这四种结构类型。

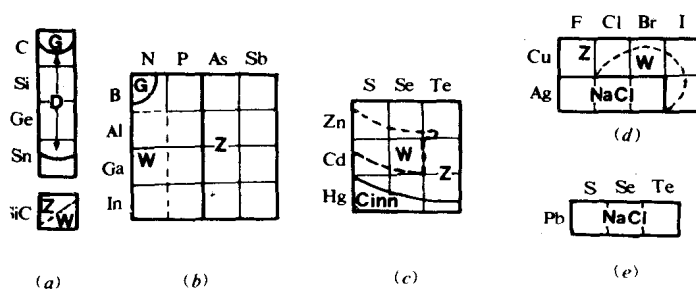


图 1.1 一些半导体材料可能形成的结构类型

大家知道,物质之所以会有各种不同的结构形式,主要是由于晶体的结合力性质的不同。晶体的结合力又称为化学键。对于由同一种原子组成的元素半导体,原子间没有负电性差,它们是通过共用一对自旋相反配对的价电子结合在一起的。亦即它们的电子云在原子间互相重叠而具有较高的密度,带正电的原子实与集中在原子间的带负电的电子云相互吸引结合成晶体。这种结合力称为共价键。在由两种不同元素的原子组成的晶体中,负电性小的原子(A)上