

高等学校教学参考书

非晶态半导体 物理学

何宇亮 陈光华 张仿清 编著

高等教育出版社

内 容 简 介

本书共分十章,主要介绍了非晶态半导体的基本概念、电子态理论、化学键与缺陷态理论、光学性质、电学性质、输运性质、掺杂和pn结理论、非晶态半导体多层膜、材料的制备与结构检测以及非晶态半导体在静电成象、太阳电池和场效应管等方面的应用原理。在内容上力图作到反映当前国际上的学术思想动态和实验结果,并有意识地收集了我国学者在非晶态半导体方面的主要研究成果。本书可作为半导体专业的大学生和研究生的教材或参考书,并可供从事有关方面工作的科技人员阅读、参考。

高等学校教学参考书

非晶态半导体物理学

何宇亮 陈光华 张仿清 编著

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 17.5 字数 420 000

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数 0001—1,550

ISBN7-04-001988-4/O·723

定价 4.60元

出版者前言

为适应高等学校固体物理学及其各分支学科课程教学的需要，高等学校理科物理学教材编审委员会固体物理编审小组和高等教育出版社组织编写了一套固体物理学科的教学参考书，其中包括固体物理学及其各分支学科的基础课程和实验课程用的教学参考书和一部《固体物理学大辞典》。这些书将由高等教育出版社陆续出版。

本书是这套书中的一本，由南京大学何宇亮、兰州大学陈光华、张仿清编著，由上海硅酸盐研究所闵嗣桂研究员审阅。

序 言

长期以来, 半导体理论全是以完整晶体为基础。周期势场已成为晶态半导体中电子输运的必要条件。到 50 年代末期, 科学家们开始打破这一界限。首先, 苏联的约飞学派指出, “只要材料本身保持短程有序性, 半导体的基本属性仍然保留”。继而 P. W. Anderson 提出了“无序势场中电子不存在扩散运动”的新理论。这些论点成为以后无序体系理论及研究的基础。60 年代末期以后, 非晶态半导体理论与应用不断涌现, 以 N. F. Mott 为首的无序理论模型, 尽管不够完善, 但在过去 20 年间对非晶半导体物理的发展起了重大作用。科学家们在 Mott 模型的基础上提出许多新理论、新思想, 以致使非晶态半导体物理成为半导体领域的一个重要前沿。

我国自 1970 年开始即开展了晶态半导体研究, 至 70 年代中期, 在理论及应用两方面均蓬勃发展。十余年来非晶态半导体学科不仅跟上了国际水平, 并且在某些课题方面有自己的特色。然而国内有关非晶态半导体的著作及论文集偏少。广大科技工作者急需一个较系统而完整的, 反映本专业范围的教材。高等教育出版社在“六五”出版计划中, 排入了非晶态半导体物理的编书计划, 由何宇亮, 陈光华, 张仿清三位同志担任编写任务。作者从晶态半导体概念出发由浅入深地阐述到非晶固体中一些较复杂的论点, 使初学者易于接受。这本著作系统地阐述了无序固体结构及有关测验方法, 隙态中电子能态及基本性质, 非周期势场中电子输运及光学性质等等非晶态半导体特有问題。它具有一定的系统性及完整性, 特别是关于化学键理论及硫系非晶态半导体、微晶硅及有关晶化问题在现有的中外书籍中很少报导。本书从化学键角度阐述

了非晶态能带结构,物理图象比较清晰,并可用来定性描述缺陷态及解释有关实验现象。硫系非晶态半导体的应用已很广泛,如静电复印鼓,彩色摄像靶,主读存储器及其他光电器件等等,本书也扼要作了介绍。作者编写的内容除系统阐述新理论、新器件、新应用外,还简单介绍了新提出而尚未成熟的问题,对国内从事科研工作及培养专业人才是大有裨益的。

闵嗣桂

1987年10月

前 言

非晶态半导体物理是凝聚态物理领域近来发展起来的一门新兴学科。由于非晶态半导体有着极为重要的应用前景和理论研究价值,所以,这门学科的发展十分迅速。它在国际上已形成了研究热潮,在国内已有许多单位正在积极开展这方面的研究工作。不仅从事研究的人员越来越多,某些非晶态半导体器件亦已趋于商品化。因此,迫切需要有一本能够全面系统地介绍这一学科内容的教科书。另一方面,作者在多年从事这方面教学中也深感到很需要一本体系较完整、内容新颖的非晶态半导体物理教学用书。这些就是作者编写书本的意图。

本书主要介绍了非晶态半导体的基本概念、电子态理论、化学键与缺陷态理论、光学性质和电学性质,输运性质,掺杂和pn结理论、非晶态半导体多层膜、材料的生长与结构检测以及非晶态半导体在静电成象、太阳电池和场效应管等方面的应用原理。在内容上力求反映迄今为止国际上最新的学术思想和实验结果,同时也意识地收集了国内学者在这一领域内的主要研究成果。

本书采用国际单位制,但由于引用国外文献,也保留了一些习惯使用的单位。书中所涉及的外国学者直接写出其外文名字。

本书大部分内容由何宇亮、陈光华二位作者分工完成。然而,书中第六章由张仿清副教授撰写,刘湘娜副教授、孙勤生副教授、邢定钰副教授以及徐希翔和王树林同志也参与了部分章节的编写工作。贺德衍同志不仅参与了部分编写,还承担了全书手稿的整理,核对和抄写工作。另外,在大纲制订过程中得到闵嗣桂研究员、徐温元教授的有益讨论,浙江大学姜国平同志也对本书提出了

许多好的见解,在此作者一并表示感谢。

本书于1982年被高等教育出版社列为固体物理教学参考书。
限于作者水平,书中难免会有许多错误和不妥之处,希望能得到有关专家和读者的指正。

作者

一九八七年五月

重要符号表

a	原子间距	$\hbar = h/2\pi$	
A	吸收系数, 面积	H	哈密顿算符
B	能带宽度	I	光强, 交迭积分, 成核率
c	真空光速	I_d	暗电流
C	电容, 代表 VI 族元素的任一原子	I_p	光电流
C_H	氢含量	I_{sc}	短路电流
C_p	比热	J	耦合常数
d	薄膜厚度, 晶粒尺寸	k	复合常数, 消光系数, 电子能量损失系数
D	扩散系数, 代表缺陷态	k	波矢量
e	电子电荷绝对值	k_B	玻尔兹曼因子
E	能量, 电场强度	K	反应平衡常数, 杂质补偿度因子
E_b	结合能, 晶间势垒高度	l	长度, 电子平均自由程
E_c	导带迁移率边能量	L	扩散长度, 长度
E_d	分界能量	L_n	电子扩散长度
E_F	费米能级	L_p	空穴扩散长度
E_{Fn}	电子准费米能级	m	自由电子质量
E_{Fp}	空穴准费米能级	m^*	电子有效质量
E_{F0}	热平衡时的费米能级	n	电子浓度, 折射率, 品质因子
E_g	禁带宽度	$\tilde{n}$	复折射率
E_{opt}	光学带隙宽度	n_i	本征载流子浓度
E_i	陷阱能级	n_0	平衡电子浓度
E_v	价带迁移率边能量	N	缺陷态密度, 原子价电子数, 原子密度, 阿佛加德罗常数
f	原子散射因子,	N_A	受主浓度
F	填充因子	N_D	施主浓度
g	载流子产生率, 朗德因子	N_c	临界杂质浓度
G	径向分布函数		
h	普朗克常数		

p 空穴浓度, 定域化参数
 p_0 平衡态空穴浓度
 P 动量, 气体压强, 电子跳跃频率, 代表V族元素的任一原子
 P_{mp} 最大功率点
 $\bar{q}$ 声子波矢
 Q^* 临界冷却速度
 r 散射因子, 指数, 半径
 $\bar{r}$ 复反射振幅
 $\bar{r}$ 径矢
 R 反射率; 电阻; 气体常数
 R_H 霍耳系数
 S 温差电动势率; 熵
 S_0 位形熵
 t 时间
 t_r 渡越时间
 $\bar{i}$ 复透射振幅
 T 温度; 透射率; 代表IV族元素的任一原子
 T_A 退火温度
 T_g 玻璃转变温度
 T_m 熔点温度
 T_s 衬底温度
 U 相关能; 生长率
 U_{eff} 电子有效相关能
 v 速度
 V 体积; 电压
 V_{oc} 开路电压
 V_p 光电压
 W 功率
 x 归一化组分变量; 厚度
 Z 原子配位数

$\bar{Z}$ 原子平均配位数
 α 吸收系数; 波函数衰减因子; 简约表面张力; 角度
 β X射线衍射峰半宽度; 简约熔化热; 角度
 ϵ 相对介电常数
 ϵ_0 真空电容率
 η 太阳能电池转换效率; 掺杂效率; 粘滞系数
 θ 角度
 λ 波长
 μ 迁移率
 μ_n 电子迁移率
 μ_H 霍耳迁移率
 μ_p 空穴迁移率
 ν 频率
 ν_{ph} 声子频率
 ρ 电阻率; 电荷密度; 声子态密度
 σ 电导率; 表面能; 俘获截面; 成键态轨道
 σ_d 暗电导率
 σ_{min} 最小金属电导率
 σ_p 光电导率
 σ_{RT} 室温电导率
 σ^* 抗键态轨道
 τ 寿命; 弛豫时间
 ϕ 电势
 χ 体结晶分数
 ψ 电子波函数
 ω 频率
 ω_p 等离子体振荡频率

目 录

重要符号表

第一章 结 论	1
§ 1.1 什么是非晶态半导体	1
§ 1.2 非晶态半导体发展简史	3
§ 1.3 非晶态半导体的分类	6
§ 1.4 晶态半导体与非晶态半导体	9
§ 1.5 无序体系	11
§ 1.5.1 原胞无序	11
§ 1.5.2 结构无序	12
§ 1.5.3 拓扑型无序	13
第二章 非晶态半导体的形成及结构检测方法	17
§ 2.1 气体的辉光放电分解法	17
§ 2.1.1 辉光放电装置	18
§ 2.1.2 辉光放电原理	19
§ 2.1.3 电子温度	21
§ 2.2 射频溅射法	22
§ 2.2.1 射频溅射原理和设备	23
§ 2.2.2 反应溅射	24
§ 2.2.3 溅射系数和沉积速率	24
§ 2.3 辉光放电等离子体中的反应过程	26
§ 2.3.1 SiH_4 的分解过程	26
§ 2.3.2 生长机理	28
§ 2.4 高速、高质量制备 $\alpha\text{-Si:H}$ 薄膜	31
§ 2.4.1 反应气体压强的影响	32
§ 2.4.2 提高 $\alpha\text{-Si:H}$ 薄膜的沉积速率	33
§ 2.4.3 辉光放电系统外加磁场	35
§ 2.4.4 大面积 $\alpha\text{-Si:H}$ 薄膜的制备	36
§ 2.4.5 硅基合金非晶态半导体薄膜的制备	37

§ 2.5 光化学汽相反应沉积法	37
§ 2.5.1 光-CVD 沉积系统及沉积过程	39
§ 2.5.2 用光-CVD 沉积 α -Si:H 膜的性质	42
§ 2.5.3 用光-CVD 技术沉积 μ c-Si:H 膜的性质	44
§ 2.6 非晶态半导体的结构模型	47
§ 2.6.1 连续无规网络模型	47
§ 2.6.2 微晶模型	48
§ 2.6.3 α -Si:H 薄膜的实际结构	49
§ 2.7 X射线衍射分析	51
§ 2.7.1 X射线衍射原理	51
§ 2.7.2 原子径向分布函数	54
§ 2.7.3 微晶粒大小的计算	56
§ 2.7.4 小角度散射	57
§ 2.7.5 扩展X射线吸收边精细结构分析	59
§ 2.8 电子显微镜技术	64
§ 2.9 红外吸收光谱	66
§ 2.9.1 红外吸收谱	67
§ 2.9.2 远红外吸收谱	70
§ 2.10 拉曼光散射	73
§ 2.11 氢含量的测定	79
§ 2.11.1 红外吸收光谱法	79
§ 2.11.2 核反应技术	81
§ 2.11.3 $^4\text{He}^+$ 离子反冲技术	83
§ 2.11.4 氢释放谱	84
§ 2.11.5 色谱法	86
§ 2.12 光电子能谱分析	88
§ 2.12.1 X射线光电子能谱	88
§ 2.12.2 紫外光电子谱	93
第三章 非晶态半导体中的化学键与缺陷态	101
§ 3.1 缺陷态的共价键理论基础	101
§ 3.2 非晶态半导体的正常结构成键	106

§ 3.3	非晶态半导体中结构缺陷的形式	110
§ 3.4	硫系玻璃和 V 族元素材料中的缺陷态	114
§ 3.4.1	荷电悬挂键模型	114
§ 3.4.2	换价对模型	116
§ 3.4.3	紧密换价对	117
§ 3.5	硅系非晶态半导体薄膜中的缺陷态	118
§ 3.5.1	悬挂键和退杂化缺陷态	120
§ 3.5.2	二配位缺陷 T_2^0	122
§ 3.5.3	三中心键	123
§ 3.5.4	亲密电荷转移缺陷	123
§ 3.6	掺杂 α -Si:H 薄膜中的缺陷态	125
§ 3.6.1	掺磷引起的缺陷态	125
§ 3.6.2	掺硼引起的缺陷态	128
§ 3.6.3	氧引起的缺陷态	130
§ 3.6.4	其它杂质缺陷态	131
§ 3.7	热力学和应力引起的缺陷态	131
§ 3.7.1	热力学引起的缺陷态	131
§ 3.7.2	应力引起的缺陷态	132
§ 3.8	非晶态半导体中的其它缺陷态	133
§ 3.8.1	孤对互作用	133
§ 3.8.2	配价键	134
§ 3.8.3	电荷补偿	135
§ 3.8.4	过渡金属和稀土元素所引入的缺陷态	136
§ 3.8.5	孤对的补偿	138
第四章	非晶态半导体的电子态与能带模型	140
§ 4.1	无序势场中电子的定域化效应	140
§ 4.1.1	定域态与扩展态	140
§ 4.1.2	Anderson 定域化的临界条件和 Anderson 转变	141
§ 4.1.3	带尾态和缺陷态的定域化	146
§ 4.1.4	Anderson 转变的一些例证	147
§ 4.2	电子相关作用, Hubbard 带	150

§ 4.2.1	Hubbard带的形成	152
§ 4.2.2	Hubbard带中的电子传导特性	153
§ 4.3	定域化的渗流理论	156
§ 4.3.1	渗流理论的基本概念	156
§ 4.3.2	无序势场中粒子的渗流理论	158
§ 4.4	定域化的标度理论	160
§ 4.4.1	重整化群理论简介	162
§ 4.4.2	Anderson定域化标度理论	164
§ 4.5	最小金属电导率	169
§ 4.5.1	电导率的计算	169
§ 4.5.2	电导率随无序势 V_0 的变化	171
§ 4.5.3	二维无序体系的 $\sigma_{\min}$	172
§ 4.6	非晶态半导体的能带模型	173
§ 4.6.1	Mott-CFO模型	173
§ 4.6.2	Mott-Davis模型	175
§ 4.7	研究隙态密度及其分布的实验方法	176
§ 4.7.1	场效应法(FE)	178
§ 4.7.2	低频C-V法	182
§ 4.7.3	深能级瞬态谱	185
§ 4.7.4	空间电荷限制电流法	196
§ 4.7.5	电子自旋共振法	202
§ 4.7.6	内光发射瞬态电流法	206
第五章 非晶态半导体中载流子的输运性质		212
§ 5.1	直流电导和迁移率	212
§ 5.1.1	费米能级附近的定域态跳跃传导	213
§ 5.1.2	带尾定域态中的跳跃传导	218
§ 5.1.3	扩展态中的传导	219
§ 5.2	温差电动势率	222
§ 5.2.1	扩展态中的传导	223
§ 5.2.2	带尾定域态中的传导	227
§ 5.2.3	费米能级附近的定域态传导	229

§ 5.3	霍耳效应	229
§ 5.4	交流电导率	234
§ 5.5	光电导	238
§ 5.5.1	光电导的复合过程	238
§ 5.5.2	光电导基本方程	243
§ 5.5.3	掺杂对光电导的影响	244
§ 5.6	弥散性传导	249
§ 5.6.1	非弥散性传导	250
§ 5.6.2	弥散性传导	252
§ 5.7	研究弥散性传导过程的实验方法	259
§ 5.7.1	渡越时间法	259
§ 5.7.2	表面传输波方法	265
§ 5.8	具有两相结构的 α -Si:H 薄膜的传导模型	268
§ 5.9	微晶硅的输运特性	273
第六章	非晶态半导体的光学性质	284
§ 6.1	光吸收	284
§ 6.1.1	吸收光谱	284
§ 6.1.2	吸收边和光学带隙	285
§ 6.1.3	弱吸收区	292
§ 6.2	影响光学带隙的因素	295
§ 6.2.1	组分对光学带隙的影响	295
§ 6.2.2	工艺条件对光学带隙的影响	303
§ 6.2.3	掺杂对光学带隙的影响	306
§ 6.2.4	$\mu\text{c-Si:H}$ 的光吸收特征	306
§ 6.3	光学常数	310
§ 6.3.1	薄膜光学	314
§ 6.3.2	非晶态半导体的光学常数	317
§ 6.4	光诱导效应及其物理机制	324
§ 6.4.1	Staebler-Wronski 效应的实验现象	326
§ 6.4.2	Staebler-Wronski 效应的物理模型	333
§ 6.4.3	用两相结构模型解释光诱导现象	337

§ 6.5 光致发光	340
§ 6.5.1 硫系非晶态半导体的光致发光	340
§ 6.5.2 硅系非晶态半导体的光致发光	342
第七章 硫系非晶态半导体和其它非晶态半导体	350
§ 7.1 非晶态固体的形成理论	350
§ 7.1.1 非晶态固体的形成本质	351
§ 7.1.2 非晶态固体的形成能力	355
§ 7.1.3 形成非晶态固体所需要的临界冷却速度	359
§ 7.1.4 形成非晶态固体能力的判据	361
§ 7.2 熔体的快速冷却法	363
§ 7.3 蒸发法	368
§ 7.3.1 电阻加热蒸发	369
§ 7.3.2 电子束蒸发	371
§ 7.4 硫系玻璃中的掺杂作用	373
§ 7.4.1 硫系玻璃掺杂的特点	373
§ 7.4.2 掺杂使电导激活能减小模型	374
§ 7.4.3 掺入过渡族元素的作用	376
§ 7.4.4 掺入卤族元素的作用	378
§ 7.5 硫系非晶态半导体的电学性质	379
§ 7.5.1 直流电导率	379
§ 7.5.2 交流电导率	381
§ 7.5.3 温差电动势率	382
§ 7.5.4 霍耳效应	385
§ 7.6 硫系玻璃的光电导现象和光致结构变化效应	386
§ 7.6.1 硫系玻璃的光电导现象	386
§ 7.6.2 硫系玻璃的光致结构变化效应	388
§ 7.7 非晶态砷的性质	393
§ 7.7.1 砷的各种形态及其制备	394
§ 7.7.2 非晶态砷的电学性质	394
§ 7.7.3 非晶态砷的光学性质	397
§ 7.8 非晶态锑的性质	399

§ 7.9 非晶态 III-V 族半导体薄膜	402
第八章 掺杂与 pn 结	410
§ 8.1 态密度分布和掺杂的可能性	410
§ 8.2 α -Si:H 薄膜的掺杂机理	411
§ 8.2.1 α -Si:H 薄膜的掺杂特性	412
§ 8.2.2 掺杂剂换价对模型	414
§ 8.2.3 DAVP 模型的实验证据	416
§ 8.2.4 两相结构模型	418
§ 8.3 磷掺杂和硼掺杂对 α -Si:H 薄膜性质和结构的影响	419
§ 8.3.1 用掺杂控制电导率	420
§ 8.3.2 掺杂对 α -Si:H 薄膜结构的影响	421
§ 8.4 其它杂质对 α -Si:H 薄膜的影响	422
§ 8.5 非晶态半导体势垒与 pn 结	424
§ 8.5.1 电荷分布与势垒的形成	424
§ 8.5.2 势垒的剖面	428
§ 8.5.3 势垒电容	430
§ 8.6 α -Si pn 结的整流特性	431
§ 8.6.1 正向特性	432
§ 8.6.2 反向特性	434
§ 8.6.3 大电流整流二极管	435
第九章 非晶态半导体的应用	439
§ 9.1 非晶态半导体的应用概况	439
§ 9.1.1 非晶态半导体的应用特点	439
§ 9.1.2 非晶态半导体的应用概况	439
§ 9.1.3 非晶态半导体的应用前景	442
§ 9.2 α -Si:H 太阳能电池的特点	442
§ 9.2.1 单晶太阳能电池发展现状	442
§ 9.2.2 α -Si:H 太阳能电池的优点	444
§ 9.3 α -Si:H 太阳能电池的工作原理和参数	445
§ 9.3.1 无光照和有光照下的 pn 结	445
§ 9.3.2 α -Si:H 太阳能电池参数	447

§ 9.4	α -Si:H 太阳能电池的结构和性能	449
§ 9.5	α -Si:H 太阳能电池的制造和应用	456
§ 9.5.1	α -Si:H 太阳能电池的制造	456
§ 9.5.2	α -Si:H 太阳能电池的应用	459
§ 9.6	提高 α -Si:H 太阳能电池效率和降低成本的一些措施	460
§ 9.6.1	本征层	460
§ 9.6.2	表面重掺杂层	463
§ 9.6.3	底部重掺杂层和衬底	463
§ 9.6.4	太阳光的有效利用	464
§ 9.6.5	降低太阳能电池成本问题	465
§ 9.6.6	提高电池的可靠性	467
§ 9.7	α -Si:H 太阳能电池中载流子输运理论	468
§ 9.8	α -Si 场效应管与集成电路	474
§ 9.8.1	α -Si 场效应管的结构及其制备工艺	475
§ 9.8.2	α -Si 场效应管的工作特性	476
§ 9.8.3	α -Si 场效应管集成电路(逻辑电路)	478
§ 9.8.4	α -Si 场效应管在液晶显示板中的应用	480
§ 9.8.5	α -Si 图象传感器	481
§ 9.9	α -Si 电荷耦合器件	482
§ 9.10	非晶态半导体静电成像器件	484
§ 9.10.1	高阻光电材料中的电荷充放电和图象记录	484
§ 9.10.2	静电成像的基本过程	486
§ 9.10.3	非晶态半导体静电成像材料	488
§ 9.10.4	静电成像器件	491
§ 9.11	α -Si _{1-x} C _x :H 薄膜发光二极管	493
§ 9.12	α -Si 的钝化保护作用	495
§ 9.12.1	α -Si 钝化膜的工作原理	495
§ 9.12.2	α -Si:H 钝化膜的应用	497
§ 9.13	硅系非晶态半导体的开关与记忆器件	498
第十章	非晶态半导体多层膜结构	504
§ 10.1	晶态半导体超晶格	504