

高等学校教材

固态电子学

张松如 孙永成 编

清华大学出版社

内 容 提 要

本书是从固体中电子运动的各种形式和过程出发,叙述固态物质的电、磁、光、声和热等各种特性和效应以及如何利用这些特性和效应构成固态器件的基本原理,涉及的固态物质有金属、半导体、超导体、磁介质和电介质等,内容较为广泛。

本书可供工科大学应用物理、电子工程、无线电和通信、材料科学和工程、电工和计算机、应用化学和生物工程等系科研究生和高年级大学生作为教材;亦可供理科大学固体物理学学科的高年级大学生和低年级研究生以及有关科技人员阅读、参考。

高等学校教材

固 态 电 子 学

陈益新 龚小成 编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 16.125 字数 336,000

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数 0001—1,150

ISBN 7-04-002473-X/O-828

定价 4.70 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丛书，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。

本书是这套丛书中的一本。

序 言

固态电子学是一门以固体中的电子过程为基础，阐明固态电子材料的各种特性和效应，以及研究如何利用这些特性和效应构成固态电子器件的基本原理的应用基础学科。以晶体管和半导体激光器为代表的固态器件的发明和发展而导致的集成电路、电子数字计算机、光纤通信、集成光路和光电子集成等许多应用技术领域的突飞猛进，成为当代信息技术的主要支柱。这是把固态物理和近代物理学中的成就与电气和电子工程应用相结合的最好实例。固态电子学是以沟通科学和工程的桥梁而获得了强大的生命力。自从六十年代开始在国外一些著名的大学中开设这门课以来，一直受到越来越广泛的重视，在内容上也有很大的充实和更新；它已成为电气和电子工程、材料科学和工程、应用物理和应用化学等许多方面的工程技术人员及学生从固态电子器件的角度出发对固态电子材料的电、磁、光、声和热等各种特性和效应及其机理进行研究，并将这些基本科学知识转变为技术进步和创造发明的不可缺少的课程。

由于历史原因，我国高等学校的课程中至今只有“固态物理学”，而从未开设“固态电子学”。而在有关的专业课程中，对固态电子材料和器件的学习，几乎都是分门别类的，例如半导体材料和器件、电介质材料和器件、磁性材料和器件以及激光材料和器件。这样造成的后果往往使学生对固体中的电子运动和对固态电子材料和器件及基本物理过程缺少完整和统一的了解，知识面不广，思路比较局限，不利于培养学生的创造性。特别应看到的是随着技术的不断进步，固态电子器件已从应用单功能材料进而应用多功

能材料或复合功能材料,从利用单一效应发展到利用多种效应,例如将MOS半导体器件中的氧化层电介质采用铁电晶体薄膜代替,就可获得非挥发性的半导体存储器;光子器件与电子器件的集成不仅可以大大改善器件的原有性能,而且还能达到单一器件所不可能获得的功能;在未来的集成光路中不仅包括了光电子集成的光源和探测器,而且还利用了如电光效应、声光效应、磁光效应和热光效应等许多相关效应所构成的调制器和其他器件。最大限度地利用固体材料的电、磁、光、声和热等自效应和相关效应将是固态电子材料和器件发展的一个重要趋向。

出于上述的认识,我们从1981年开始,参照了国外一些“固态电子学”的教科书以及有关期刊,对应用物理系的高年级大学生和一年级研究生开设了“固态电子学”课程,同时也作为其他系,如材料科学和工程系、电子工程系等的学生的选修课。七年的教学实践表明,“固态电子学”课程对扩大学生知识面,培养学生的创造性和提高学生对于高科技工作的适应性是有帮助的,因而引起了更多师生的兴趣和重视。

由于迄今尚没有“固态电子学”的中文教科书,开始两次讲课都选用几本英文课本。为了进一步把这门课程提高和推广,就在历次讲课提纲和讲稿的基础上整理成“固态电子学”讲义,共分上下两册。本教科书是在讲义的基础上,根据多年的教学实践修改而成的。希望通过广泛使用和更多积累教学经验,对其加以进一步的提高和完善。

本书适用于电工和计算机、电子工程、无线电和通信、材料科学和工程、应用物理、应用化学和生物工程等系科三、四年级大学生。由于这是一本带有引论性质的教科书,所以在内容上力求避免用较多的教学演算而能给出清晰的物理概念。只要具备一些近代物理和量子力学的基本知识和基本概念,就不难学习这门课程。

上述系科的低年级研究生也可选用本教材，教学中必要时可补充内容，学生也可多阅读一些每章所附的参考书和文献。适合于研究生用的高层次的“固态电子学”待取得更多经验后再行编写。

全书共分七章。第一章介绍金属和半导体电子学，这里所讨论的特性和效应都与电子的输运过程有关；第二章讨论利用这些特性和效应构成各种半导体器件的基本原理；第三章光电子和光电器件中所述及的那些效应和现象虽与电子输运过程有关，但起主导作用的往往是电子的跃迁过程。超导现象也可看作电子的输运过程，但与金属和半导体的导电特性差别极大，特别近年来高临界温度超导材料的发现，对超导现象和应用又提出了许多新的研究课题，这部分内容作为第四章；与电子的自旋和轨道运动过程相联系的磁性和磁效应及其在磁电子器件中的应用将在第五章阐述。束缚状态的电子发生位移时形成极化，当电场从直流变到光频以上（甚至可包括 γ 射线在内）变化时，极化过程所伴随着的各种效应都在第六章讨论；最后一章介绍固体中相关效应，主要讨论电介质中电、光、声和热效应之间的相互作用，这里虽然不能包括固体中全部的相关效应，但读者从这一章可以得到启迪，应该如何进一步发现和运用固体中一切可能出现的效应来发展新一代固态电子器件。贯穿全书各章的统一思想是以固体中电子运动的各种形式和过程作为认识的基础来理解固体所呈现的全部特性和效应，同时又把这些电子过程和效应的形成与固体微观结构的特征紧密相联系。因而，读者将获得对固态电子学，包括物质结构、电子过程、特性和效应、材料和器件较完整的认识。由于本书是一套固体物理教学参考书中的一本，为避免内容重复，有关晶体结构、能带理论等一些详细内容，在把讲义修改成书时，已于删节。

本书第一、二、三、五章由龚小成副教授执笔，第四章由蒋建飞教授执笔，第六章由陈益新教授执笔，第七章由徐敬舆副教授执

笔。全书由陈益新教授统稿。本书的编写和出版得到了方俊鑫教授的热忱支持和推荐。在编写本书的过程中，复旦大学陆栋教授、蒋平副教授曾提出了许多宝贵意见。谨在此表示衷心感谢。由于我们水平有限、不妥和错误之处恐怕难免，欢迎读者批评指正。

编者

一九八八年九月

重要符号表

a	晶格常数	E_V	价带顶能量
A	面积; 交换积分	E_{FN}	N型半导体费密能级
A	矢势	E_{FP}	P型半导体费密能级
B	频带宽度; 爱因斯坦系数	E	电场强度
B	磁感应强度	f	分布函数; 占有几率; 频率
B_0	真空中的磁感应强度	f^*	声频率
c	真空光速; 比热; 弹性模量	f_T	电流增益-带宽乘积
c_n	介质中光速	F	力
C_r	光能流密度	F	自由能; 晶体管噪声系数; 过剩噪声因子
C	电容; 居里常数	g	朗德因子
C_B	PN结势垒电容	G	状态密度; 电导; 吉布斯自由能; 光增益
d	厚度; 光透入深度; 间距	G_P	功率增益
D	扩散系数; 探测率	G_V	电压增益
D^*	探测灵敏度	h	普朗克常数; 高度
D_n	电子扩散系数	\hbar	$\hbar = h/2\pi$
D_p	空穴扩散系数	H	焓
D	电通量密度	H	磁场强度
e	电子电荷绝对值	H_0	矫顽力
e^*	超导电子电荷	\hbar	哈密顿算符
E	电子能量; 电场强度; 杨氏模量	I	电流强度; 光强度
E_A	受主电子态能量	I_b	晶体管基极电流
E_B	束缚能	I_C	晶体管集电极电流; 约瑟夫森结临界电流
E_G	导带底能量	I_D	暗电流
E_D	施主电子态能量	I_e	晶体管发射极电流
E_F	费密能量; 费密能级		
E_g	禁带宽度		

I_r	复合电流	M	雪崩倍增因子; 磁化强度; 声 光优值
I_B	背景光电流	M	磁化强度
I_H	约瑟夫森结超流	M_s	自发磁化强度
I_{no}	声功率密度	n	电子浓度; 折射率
I_{ph}	光电流	n_i	本征载流子浓度
j	磁偶极矩	n_s	超导电子对浓度
j_n	电子流密度	n_{sN}	超导电子对和常导电子浓度 之和
j_p	空穴流密度	n_{eff}	导模有效折射率
J	电流密度; 磁极化强度	N	原子密度; 分子密度; 退磁因 子
J_0	约瑟夫森结临界电流密度	N_A	受主浓度
J_n	电子电流密度	N_D	导带有效能级密度
J_p	空穴电流密度	N_D	施主浓度
J_s	超导电流密度	N_V	价带有效能级密度
J_{sN}	超导和常导电流密度之和	NA	数值孔径
J_H	约瑟夫森结超流密度	p	空穴浓度; 热电系数
k	电子波矢; 消光系数	p	电偶极矩; 角动量
k	电子波矢; 光波矢	P	几率; 光功率; 应变弹光系数
k_B	玻耳兹曼常数	p	角动量; 电极化强度
K	电子电离率与空穴电离率之 比; 磁晶各向异性常数; 电 耦合系数	p_F	费密动量
K	声波矢	q	电荷量
l	长度	q	声子波矢
L	扩散长度; 长度	Q	电荷面密度; 品质因素
L_n	电子扩散长度	r	距离; 半径; 原子间距
L_p	空穴扩散长度	R	电阻; 霍耳系数; 反射系数; 二 次电光系数
m	电子质量; 调制度; 大气质量 数	R_c	接触电阻
m	磁矩; 交变磁化强度	R_L	负载电阻
m^*	超导电子质量	R_N	非线性准粒子电阻
m_n^*	电子有效质量	R_{sp}	光谱响应度
m_p^*	空穴有效质量		

θ	塞贝克系数		
S	熵; 应变		
S	坡印廷矢量	Γ	位相差; 克里斯托尔模量
t	时间	δ	位相角; 磁损耗角; 电介质损耗角
T	温度; 透射系数	Δ	超导体能隙参数
T_C	居里温度; 临界温度	ϵ_0	真空介电系数
T_F	费密温度	ϵ_r	相对介电系数
T_N	奈尔温度	η	晶体管基区输运系数; 效率; 量子效率; 光电转换效率, 发光效率; 有序度
T_r	隧道贯穿几率	θ	角度; 平面角; 天顶角
T_R	复合引起的损耗速率	θ_0	抵消点
u	布洛赫波的周期性调制函数	λ	光波长; 外斯分子场常数; 磁致伸缩系数; 第一拉姆系数
U	内能	Λ	声波长
v	速度	λ_0	半导体本征吸收长波限
v_a	漂移速度	λ_L	伦敦穿透深度
V	晶体体积; 电压; 电势	μ	迁移率; 磁导率; 刚性系数
V	超导电子运动速度	$\bar{\mu}$	复磁导率
V_D	接触电势差	μ'	复磁导率实部
V_n	约瑟夫森结电流阶梯处电压	μ''	复磁导率虚部
V_s	表面势	μ_+	正圆偏振波磁导率
V_T	阈值电压	μ_-	负圆偏振波磁导率
w	能量密度	μ_B	玻尔磁子
x	化合物的组成成分; 位移	μ_H	霍尔迁移率
α	方向余弦; 平面角; 晶体管共基极电流增益; 光吸收系数	μ_n	电子迁移率
α	衰减矢	μ_0	真空磁导率
α_e	电子电离率	μ_p	空穴迁移率
α_p	空穴电离率	ν	频率; N型高阻半导体; 泊松比; 声光调制制度参量
β	方向余弦; 增益因子; 晶体管共发射极电流增益	ξ	位移矢
β	位相矢		
γ	晶体管发射区注入效率; 磁旋比; 磁畴壁能密度; 传播系		

π	P型高阻半导体	ϕ_{ms}	金属-半导体接触肖特基势垒高度
Π	珀尔帖系数	Φ_0	磁通量子
ρ	电阻率; 密度	χ	电子亲和势; 磁化率; 电极化率
σ	电导率; 应力; 电荷面密度	ψ	电子波函数; 平面角; 超导体对宏观波函数
τ	寿命; 弛豫时间; 汤姆逊系数; 声渡越因子	ω	圆频率; 光圆频率
τ_p	位相延迟	Ω	声圆频率
τ_{eff}	有效准粒子寿命	ω_0	晶格振动固有频率
ϕ	位相角; 平面角; 超导体量子位相; 功函数		
Φ	噪声谱密度		

目 录

重要符号表	1
第一章 固态电子论基础	1
§ 1.1 周期性势场中的电子和能带论	2
§ 1.2 金属、半导体和绝缘体,有效质量和空穴	8
§ 1.3 金属中的自由电子	15
§ 1.4 半导体中的载流子	21
§ 1.5 半导体材料	28
§ 1.6 几种固态电子的体效应	34
§ 1.7 固态电子能谱	40
习题	45
参考文献	46
第二章 半导体器件原理	48
§ 2.1 PN 结特性概述	48
§ 2.2 PN 结二极管	54
§ 2.3 双极型晶体管	61
§ 2.4 金属-半导体接触和肖特基势垒二极管	69
§ 2.5 场效应晶体管	77
§ 2.6 异质结及其器件	86
§ 2.7 半导体集成器件和微细加工技术	96
习题	110
参考文献	111
第三章 光电子学和光电器件	114
§ 3.1 固体的光吸收	114
§ 3.2 固体的光发射	118
§ 3.3 非增益型半导体光电探测器	121
§ 3.4 增益型和异质结半导体光电探测器	128

§ 3.5 PN 结光生伏特效应和太阳电池	141
§ 3.6 发光二极管	151
§ 3.7 半导体激光器	157
习题	176
参考文献	176
第四章 超导电子学	180
§ 4.1 完全导电性和完全逆磁性	180
§ 4.2 二流体模型	183
§ 4.3 伦敦方程	185
§ 4.4 超导 BCS 理论的物理图象	187
§ 4.5 超导准粒子隧道效应	191
§ 4.6 超导电子对隧道效应	208
§ 4.7 超导器件原理	218
§ 4.8 新型高 T_c 氧化物超导电性和材料	240
参考文献	246
第五章 磁电子学	248
§ 5.1 原子磁矩	250
§ 5.2 逆磁性和顺磁性	252
§ 5.3 铁磁性	259
§ 5.4 反铁磁性和亚铁磁性	270
§ 5.5 铁磁体的磁畴理论	278
§ 5.6 铁磁体的静态磁化过程	290
§ 5.7 动态磁化过程; 磁共振	298
§ 5.8 磁性元、器件	311
§ 5.9 磁性材料	320
习题	326
参考文献	327
第六章 电介质的电子性质	329
§ 6.1 电介质极化	330
§ 6.2 电介质损耗和色散	341
§ 6.3 电介质电导和击穿	357

§ 6.4 电介质材料和应用	375
§ 6.5 压电性	386
§ 6.6 热电性	393
§ 6.7 铁电性	400
§ 6.8 驻电性	413
习题	417
参考文献	419
第七章 电介质中的电、光、声的相互作用	421
§ 7.1 光波在电介质中的传播	421
§ 7.2 光波导现象	429
§ 7.3 声波在固体中的传播	436
§ 7.4 电声效应	447
§ 7.5 声光效应	454
§ 7.6 电光效应	461
§ 7.7 热光效应	468
§ 7.8 纤维光学和集成光学	471
习题	482
参考文献	483
主题索引	484

第一章 固态电子论基础

固态物质由大量原子(分子)组成,按其内部结构可分为晶态和非晶态两大类。晶态固体(晶体)中的原子(分子)按一定的周期性作规则排列,这种有序排列的范围一般在微米量级,称为长程有序。晶体又可分为单晶和多晶。整块晶体中原子(分子)都按一定周期性作规则排列的为单晶;若整块晶体由许多小晶粒组成,在小晶粒范围内原子(分子)作规则排列的为多晶。非晶态固体(非晶体)原子(分子)的排列没有上述长程有序的周期性,结构很不规则。但实验得出,非晶体原子(分子)的排列,在一个原子间距范围内仍有一定规律;也就是说,每一原子周围最近邻原子的排列具有一定规律,称为短程有序。本书中讨论的固态物质,若不指明,都是指的单晶体。

固体中的电子同孤立原子中的电子不同,也同自由电子不同。孤立原子中的电子只受本身的原子核和其它电子势场作用,能量是一系列分立的能级。完全自由电子不受任何外力作用,在恒定为零或常值的势场中运动,能量是连续的。固体中电子受周期性重复排列的原子的势场作用,其能量介于孤立原子和完全自由电子之间,形成一系列的能带;能带同能带之间是能量的禁区即禁带。通常就用能带论来描述固体中电子的运动状态。能带论是目前研究固体中电子运动的一个主要理论基础,它成功地解释了金属、半导体和绝缘体之间的差别;研究固体中的电学、光学和磁学等性质都要用到能带论。

若电子在严格周期性势场中运动,没有受到其它因素影响,电子的状态不会改变,电子的速度也不会改变。实际晶体中存在各

种不完整性,如晶格原子的振动、晶体中的杂质、缺陷等,导致对严格周期性势场的偏离。这种偏离,使电子的势能改变,因而其速度发生变化,这就使电子因受到散射而改变运动状态。当有外电场作用时,电子一方面受电场力的作用,产生定向运动;另一方面,散射又不断改变电子的运动。外电场使电子的分布发生非平衡变化,散射则要使电子的分布恢复平衡。从能够确定非平衡分布函数的玻耳兹曼输运方程出发,能解释固体的导电性。

本章先扼要叙述能带论的一些基本概念和结论;接着讨论金属和半导体的导电性;然后,讨论固体中一些有关效应,如磁电效应、热电效应等。最后,将对固态电子能谱作一些介绍。

§ 1.1 周期性势场中的电子和能带论

本节先对电子共有化运动形成能带作定性描述,然后扼要叙述量子力学处理周期性势场中的电子得出能带理论的一些基本概念和结论。

1. 能带形成的定性描述

孤立原子中电子的能量状态对应一系列能级。当原子相互靠近形成晶体时,不同原子的电子波函数发生交叠。波函数交叠的电子不再局限在某一个原子上,而可以由一个原子转移到相邻原子上去。因而,电子可以在整个晶体中运动,称为电子的共有化运动。电子共有化运动有两个特点:(1)因为各原子的相似电子波函数,例如, $3s$, 对应相等的能量,因此,一般为相似电子波函数交叠而产生共有化运动。(2)晶体中电子,既有绕原子核的原子运动,又有共有化运动。外层电子,波函数交叠强,共有化运动显著;内层电子,波函数交叠弱,原子运动显著。

由于电子作共有化运动,受到其它原子势场的作用,使能量状态发生变化。例如,两个原子的 $2s$ 电子波函数相互交叠后,对应

的能级分裂成两个靠得很近的能级。图 1-1 中 (a) 和 (b) 表示出二个和八个原子相互靠近能级分裂的情况。若晶体单位体积有 N 个原子，一般 N 很大，约 10^{28} m^{-3} ， N 个靠得很近的能级形成一个能带，如图 1-1(c) 所示。能带中的能量可看成是连续的。由 N 个能级形成的这样的能带又称为允许带，允许带之间没有能级，是禁带。

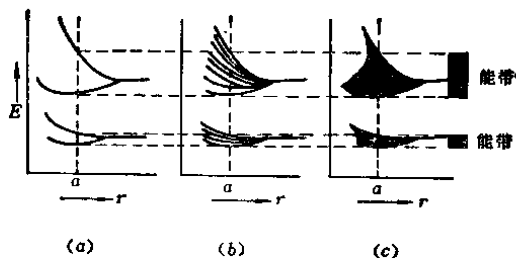


图 1-1 原子能级分裂为能带的示意图

(a) 二原子；(b) 八原子；(c) N 个原子，图中 r 为原子间距

2. 周期性势场中的电子^[1]

晶体由大量原子周期性重复排列组成。每个原子又包含原子核和电子，它们之间均有相互作用。这是一个多体问题。量子力学中处理这个多体问题，原则上应当写出其薛定谔方程，那是一个包含大量变量的偏微分方程，难于严格求解，可用近似方法将这个多体问题化为单体问题来解决。

由于原子核的质量比电子的质量大得多，电子的运动很快而格点上的离子运动得很慢，可认为离子都固定在平衡位置上不动，好象离子的运动和电子的运动之间互不交换能量，称之为绝热近似。这样，多粒子的多体问题就首先简化为多电子问题。

其次，如何把多电子问题化为单电子问题呢？由于晶体中一个