

高等学校教学参考书

半导体物理学

下 册

叶良修 编著

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是高等学校理科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的一套固体物理学科教学参考书中的一本。全书共十六章,分上、下两册出版。上册主要包括一般教学中所涉及到的比较基本的内容,包括结构和结合性质、半导体中的电子状态、载流子的平衡统计、电荷输运现象、过剩载流子、pn结、半导体表面层和MIS结构、金属-半导体接触和异质结等八章。下册则收入一些专题,包括载流子的散射、热现象、复杂能带输运、强电场下的热电子、光的吸收和反射、磁光现象、量子磁输运和磁共振等八章。本书可供已学过固体物理学课程的大学生、研究生及有关方面的科技人员阅读、参考。

高等学校教学参考书

半导体物理学

下 册

叶良修 编著

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 19.75 字数 476 000

1987 年10月第1版 1987 年10月第1次印刷

印数 00 001—2,650

书号 13010·01405 定价 4.40 元

出版者前言

为适应高等学校固体物理学及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叶良修编著。

符 号 表

a	晶格常数; $\tau = a\epsilon^r$ 中的常数因子; 玻尔半径
a^*	等效玻尔半径
A	面积; 微扰势的傅立叶系数
$\mathbf{A}$	矢势
b	迁移率比; 宽度; 磁阻参数
$B, \mathbf{B}$	磁感应强度
B^*	有效磁感应强度
c	真空光速; 磁阻参数
c_l	纵弹性常数
c_t	切变模量
C	态密度 $C\epsilon^{\frac{1}{2}}$ 中的系数; 热容; 弹性常数张量
d	厚度; 磁阻参数
D	电位移; 变换矩阵; 扩散系数
D_i	i 谷的变换矩阵
D_n	电子扩散系数
e	电子电荷绝对值
$\hat{e}$	单位矢量
e^*	有效电荷
E	电子能量; 电场强度
$\mathbf{E}$	电场强度
E^*	有效电场强度
E_A	导带边能量

E_B	价带边能量
E_C	导带边能量; 导带迁移率边
E_F	费米能级
E_{Fe}	电子准费米能级
E_{Fh}	空穴准费米能级
E_f	终态能量
E_i	初态能量; 中间态能量
E_a	声电场
E_P	平面霍尔电场
E_{ph}	声子曳引效应引起的附加温差电场
E_V	价带边能量; 价带迁移率边
$\mathcal{E}$	电场强度
f	分布函数; 占有几率; 振子强度; 有效质量近似波函数
f_0	导带电子占有几率
f_{0h}	导带空穴占有几率
f_V	价带电子占有几率
f_{Vh}	价带空穴占有几率
F	力
g	态密度; 朗德因子
g_{CV}	导带、价带联合态密度
g_{ph}	光子态密度
G	电导; 光增益
G_M	最大光增益
G_{th}	阈值光增益
h	普朗克常数
$\hbar$	$\hbar = h/2\pi$
h_{pz}	压电常数

H	哈密顿算符
$\mathcal{H}_n$	n 阶厄密多项式
I	电流强度; 重叠积分; 光强
$j, \mathbf{j}$	电流密度
j_n	电子电流密度
j_{nom}	标称电流密度
j_p	空穴电流密度
J	声能流密度; 粒子流密度; 径向分布函数
$k, \mathbf{k}$	电子波矢
k_B	玻尔兹曼常数
$k_f, \mathbf{k}_f$	终态电子波矢
k_F	费米能级处电子波矢
k_L	光子波矢
K	压电耦合系数; 纵向、横向电子有效质量比 m_l/m_t
K_n	倒格矢
K	约化波矢
$\mathcal{K}$	修正贝塞尔函数
l	长度; 平均自由程
L	长度; 罗伦兹数
L_D	德拜长度
m	有效质量; 弹性电阻张量
m_c	回旋有效质量; 导带有效质量
m_D	施主核磁量子数
m_{hc}	重空穴回旋有效质量
m_H	霍尔有效质量
m_l	纵向有效质量
m_{lc}	轻空穴回旋有效质量

m_n	电子有效质量
n_p	空穴有效质量
m_p	极化子有效质量
m_r	约化有效质量
m_s	电子磁量子数
m_t	横向有效质量
m_0	自由电子质量
M	磁阻 $\Delta\rho B^2/\rho$; 跃迁矩阵元; 原子质量; 倍增因子
M_n	电子倍增因子
M_p	空穴倍增因子
M_r	折合原子质量
M'	折合原子量
n	电子浓度; 载流子浓度; 折射率; 朗道量子数; 光子数
n_A	带尾定域态电子浓度
n_c	扩展态电子浓度
n_e	有效折射率
n_i	第 i 谷电子浓度
n_s	与空间电荷相联系的电子浓度
n_t	陷阱上的电子浓度
n_i^{ex}	束缚激子浓度
n_0	平衡电子浓度
N	原子密度; 单位体积中原胞数; 杂质浓度
N_A	带尾定域态等效态密度
N_G	导带等效态密度; 扩展态等效态密度
N_{inv}	反型载流子面密度
N_I	电离杂质浓度; 位错密度
N_n	中性杂质浓度

N_q	波矢为 q 的声子数
N_s	自旋密度
p	空穴浓度
p	动量算符
p_{ij}	动量矩阵元
p_h	重空穴浓度
p_l	轻空穴浓度
P	散射几率; 压力; 极化; 爱廷豪森系数; 单位体积功率消耗
P_H	平面霍尔系数
q, q	声子波矢; 光子波矢
q_+	右旋光相常数
q_-	左旋光相常数
Q	热量; 单位时间吸收(释放)的能量; 位形坐标
Q_N	能斯特系数
Q_s	表面层电荷面密度
r	$\tau \propto \epsilon^r$ 中的指数; 随机数; 半径; 原子间距
r	位矢
r_H	霍尔因子
r_{ij}	黄昆方程组的系数
r_{sp}	单位能量间隔自发发射速率
r_∞	半无穷样品垂直反射率
R	霍尔系数; 复合速率; 反射率; 半径
R	位矢
R_H	霍尔系数
R_{sp}	自发发射速率
s	等价能谷数
S	熵; 形变; 输运熵; 里纪-勒杜克系数; 能量通量; 黄-李因子

t	时间
t_i	渡越时间
T	温度; 渡越时间; 应力张量; 单轴应力; 谷间电子转移速率
T_D	丁格尔(Dingle)温度
T_e	载流子温度
u	布洛赫波的周期调制函数; 位移
U	能量
$v, \mathfrak{v}$	速度
v_d	漂移速度
v_{phd}	声子漂移速度
v_s	声速
v_{st}	饱和速度
V	晶体体积; 电势; 势能
V_E	爱廷豪森电压
V_G	栅压
V_H	霍尔电压
V_N	能斯特电压
w	位移
$\mathfrak{w}$	热流密度; 约化位移
$\mathfrak{w}_{ph}$	和声子相联系的热流密度
W	跃迁几率; 微扰; 带宽
W_{sp}	自发发射几率
x	化合物的成分
z	温差电优值; 约化温度的倒数 θ/T
Z	以 e 为单位的电荷数; 阻抗
α	输运系数; 吸收系数; 波函数衰减常数; 精细结构常数; 极性偶合常数; 温差电动势率; 声衰减系数; α^{-1} 为磁长度; 电子

电离率;电子电导率空穴电导率之比

α^B	磁场下的光吸收系数
α_{fc}	自由载流子吸收系数
α_n	n型半导体温差电动势率
α_p	p型半导体温差电动势率
α_+	吸收声子的光吸收系数
α_-	发射声子的光吸收系数
β	输运系数;温电子输运系数;空穴电离率
γ	漂移参量;阻尼系数;注入效率
Γ	Γ 函数;光限制因子
δ	δ 函数
Δ	自旋轨道分裂
ε	相对介电常数;形变张量
ε_0	真空电容率
ε_∞	高频介电常数
ϵ	相对带边的载流子能量
ϵ_A	受主电离能
ϵ_{Bx}	激子束缚能
ϵ_d	声学波形变势常数
ϵ_D	施主电离能
ϵ_{ex}	激子束缚能
ϵ_F	费米能级处电子能量;法拉第椭圆率
ϵ_g	禁带宽度
$\epsilon_{g\Gamma}$	Γ 点禁带宽度
ϵ_{gX}	X点禁带宽度
ϵ_n	电子动能
ϵ_p	空穴动能

ϵ_i	陷阱对电子的束缚能
ϵ_T	阈值能量
ϵ_V	佛克脱椭圆率
ξ	相对带边的费米能, $\xi_n = E_F - E_C$, $\xi_p = E_V - E_F$
η	约化费米能, $\eta = (E_F - E_C)/kT$; 量子效率; 无规相因子; 折射率实部; 比例分数
$\bar{\eta}$	复折射率
η_+	右旋光折射率
η_-	左旋光折射率
θ	角度; 散射角; 法拉第角; 声子温度; 温差电动势
θ_D	德拜温度
θ_i	谷间声子温度
θ_l	纵光学声子温度
θ_V	佛克脱角
κ	热导率; 折射率虚部
κ_e	电子热导
κ_L	晶格热导
λ	波长; 声子自由程
λ_{ph}	声子自由程
μ	迁移率; 有效质量比 m_n/m_p
μ_{ac}	声学波散射迁移率
μ_{all}	合金散射迁移率
μ_B	玻尔磁子
μ_{cc}	载流子-载流子散射迁移率
μ_d	漂移迁移率
μ_D	施主核磁矩
μ_e	电子磁矩

μ_I	电离杂质散射迁移率; 谷间散射迁移率
μ_n	同位素核磁矩
μ_N	核磁子
μ_{op}	光学波散射迁移率
μ_{po}	极性光学波散射迁移率
μ_{pz}	压电散射迁移率
μ_0	真空磁导率
ν	频率; $\nu = \frac{gm}{2m_0}$
ν_l	纵光学声子频率
Ξ	形变势常数
Π	压阻张量; 帕耳帖系数
ρ	电阻率; 电荷密度; 密度; 原子密度
ρ_H	霍尔电阻
ρ_t	横向磁阻
ρ_α	单位立体角、单位能量间、偏振为 α 的光子密度
σ	电导率; 汤姆逊系数
σ_H	霍尔电导率张量
σ_i	第 i 个谷的电导率
σ_{ij}	电导率张量元素
σ_M	磁阻电导率张量
σ_n	电子电导率
σ_p	空穴电导率
σ_{ph}	光电导
σ_{RT}	室温电导率
σ_0	零场电导率
$\sigma^{(1)}$	含磁场一次项的电导率张量
$\sigma^{(2)}$	含磁场二次项的电导率张量

τ	过剩载流子寿命;弛豫时间;时间常数
τ_d	介电弛豫时间
τ_{ex}	激子寿命
τ_i	谷间跃迁时间常数
τ_n	电子弛豫时间;无辐射复合寿命
τ_{nr}	无辐射复合寿命
τ_p	空穴弛豫时间
τ_{ph}	声子平均自由时间
τ_r	辐射复合寿命
τ_R	恢复时间常数
τ_e	能量弛豫时间
φ	电子波函数
ϕ	角度;布洛赫波展开系数
ψ	电子波函数
ω	角频率
ω_c	回旋频率
ω_{ce}	电子回旋频率
ω_{ch}	空穴回旋频率
ω_{cr}	$\omega_{cr} = \omega_{ce} + \omega_{ch}$
ω_d	介电弛豫频率
ω_D	扩散频率
ω_l	纵光学声子角频率
ω_L	光角频率
ω_o	光学声子角频率
ω_p	等离子体频率
ω_s	声子角频率
ω_t	横光学声子角频率
Ω	立体角;原胞体积

目 录

符号表

第九章 载流子的散射.....497

§ 9.1 跃迁几率.....497

§ 9.2 屏蔽库仑势和电离杂质散射.....502

§ 9.3 声学波形势散射.....509

§ 9.4 声学波压电散射.....516

§ 9.5 光学波形势散射和等价谷间散射.....520

§ 9.6 极性光学波及其散射.....531

§ 9.7 载流子之间的散射.....543

§ 9.8 其它晶格缺陷的散射.....546

§ 9.9 各种半导体中的散射机制.....552

第九章参考文献.....563

第十章 半导体中的热现象.....569

§ 10.1 半导体的热导.....569

§ 10.2 热电效应及其相互联系.....584

§ 10.3 温差电动势率.....592

§ 10.4 热磁效应.....595

§ 10.5 声子曳引效应.....607

第十章参考文献.....612

第十一章 复杂能带中的输运现象.....615

§ 11.1 多谷带的电导、霍尔效应和磁阻.....615

§ 11.2 压阻效应.....626

§ 11.3 声电效应.....642

附录 11.1 Nerring-Vogt 变换.....657

第十一章参考文献.....660

第十二章 强电场下的热电子.....663

§ 12.1 热电子和强电场下的迁移率.....663

§ 12.2	转移电子效应	684
§ 12.3	蒙特卡罗法	696
§ 12.4	多谷带的热电子效应	704
§ 12.5	强电场下的电流磁效应	709
§ 12.6	雪崩击穿和碰撞电离	715
§ 12.7	热载流子的扩散	726
§ 12.8	反型层中的热电子	730
第十二章参考文献		734
第十三章 光的吸收和反射		741
§ 13.1	光的吸收和基本吸收边	742
§ 13.2	基本吸收和能带结构	761
§ 13.3	激子和激子吸收	768
§ 13.4	杂质吸收	775
§ 13.5	自由载流子吸收	782
§ 13.6	晶格吸收和反射	794
第十三章参考文献		798
第十四章 磁光现象 量子磁输运 磁共振		804
§ 14.1	磁量子化和自旋分裂	804
§ 14.2	振荡磁吸收	812
§ 14.3	迴旋共振	827
§ 14.4	几种其它磁光效应	836
§ 14.5	振荡磁阻	849
§ 14.6	横向磁阻和量子化霍尔效应	857
§ 14.7	磁声子效应	870
§ 14.8	电子自旋共振和电子-核双共振	873
第十四章参考文献		893
第十五章 半导体中的发光现象		900
§ 15.1	自发发射和受激发射	900
§ 15.2	发光光谱	904
§ 15.3	发光二极管	925
§ 15.4	半导体激光器	942

第十五章参考文献	951
第十六章 非晶态半导体	963
§ 16.1 非晶态半导体的结构	969
§ 16.2 非晶态半导体中的电子状态	979
§ 16.3 非晶态半导体中的输运现象	993
§ 16.4 非晶态半导体的光吸收	1003
§ 16.5 非晶态 Si、Ge 中的隙态和掺杂效应	1021
§ 16.6 硫系非晶态半导体	1036
第十六章参考文献	1051
主题索引	1062
材料索引	1089

第九章 载流子的散射

在这一章中我们进一步讨论半导体中各种散射机制，主要是各种类型的晶格散射和电离杂质散射。多年来由于在这个领域中大量的实验研究和理论研究工作，人们对半导体中各种散射过程的认识得到了显著的深化。尽管仍然还有许多问题有待进一步解决，但在不少情形下已经能够对各种输运参量进行定量计算。这一章中我们将导出各种情形下的跃迁几率和弛豫时间，并主要通过讨论迁移率的讨论来说明它们在各种半导体中的作用。但即使是对于迁移率的讨论，也只是主要通过采用简单模型进行（具有球形等能面的抛物性带、非简并统计、略去载流子的屏蔽作用等。考虑各种实际因素通常将要求复杂的计算，以致于数值计算），以达到说明各机制的主要性质的目的。

我们将从一般讨论载流子由一个状态散射到另一状态的跃迁几率开始。

§9.1 跃迁几率

任何偏离理想周期势的附加势都可引起载流子的散射。为要利用式(4-A 2-16)和(4-A 2-17)计算散射几率和弛豫时间，必须首先得到在附加势 $V(x, t)$ 的作用下载流子由一个状态 k 跃迁到另一状态 k' 的几率 $W(k, k')$ 。它代表单位时间内由 k 向 k' 跃迁的次数。