

高等学校教学参考书

# 半导体物理学

上

册

叶良修 编著

高等教育出版社

# 半导体物理学

上 册

叶良修 编著

高等教育出版社

## 内 容 提 要

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的基本的内容,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、半导体的表面层及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、强磁场和磁共振现象、光发射、非晶态半导体等八章。本书可供已学过固体物理学课程的大、研究生以及有关方面的工作人员阅读、参考。

高等学校教学参考书

### 半导体物理学

上 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

北京印刷三厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 16.5 字数 400,000

1983年11月第1版 1984年5月第1次印刷

印数 00,001—10,500

书号 13010·0929 定价 2.50 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，由北京大学叶良修副教授编著，黄昆教授审订。

## 前 言

在从事教学的过程中，深感需要有一本较多反映近年来半导体物理发展的教学参考书。这就是作者编写本书的意图。

一九五八年出版的由黄昆教授和谢希德教授合写的《半导体物理学》是大家公认的一本好书。它以对物理概念的清楚、准确和精辟的阐述吸引着读者。因此在编写本书时作者力图吸取这本书的精华。

由于本书所涉及的内容比较广泛，分上下两册出版。上册包括一般教学中所涉及比较基本的内容(参看本书目录)，而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、强磁场和磁共振现象、光发射、非晶态半导体等章中的部分内容。但是，这种划分也并不是绝对的，像热电子现象及光的吸收和发射等也具有基本内容性质，至于各章内容的处理，为了便于教学上的选择，一般把更基本的内容安排在一个章节的较前面的部分。当然，这只是作者个人的考虑，读者还可以根据需要加以调整。

本书采用国际单位制，但保留习惯使用的单位。重要的公式一般都写成了便于计算的形式。由公式本身一般可以立刻得到有关物理量的数量级的概念。

本书是作者在北京大学讲课所用的讲义的基础上编写的，本书在编写过程中始终得到了黄昆教授的关怀，他不仅审阅了本书，而且进行了具体的指导并作了若干重要修改。作者在此表示衷心的感谢。

作者在编写本书的过程中和韩汝琦、武国英同志进行了很多

有益的讨论。他们在本书的内容选取和组织上都提出了许多宝贵意见。和李志坚、甘子钊、秦国刚、李瑞伟、刘文明、杨顺华、张绮香、江丕桓、虞丽生、梅良模、杨楚良、林彰达、黄培忠、王子滨等同志就有关问题进行了有益的讨论。这些对于本书的编写也有很大帮助，在此一并表示感谢。

限于作者的水平，本书难免有许多错误和不妥之处。希望得到有关方面的专家和读者的指正。

叶良修

一九八三年三月十四日

## 重要符号表

$a$	晶格常数; $\tau = a\epsilon^r$ 中的常数因子; 玻尔半径
$\mathbf{a}$	基矢
$A$	面积
$A^*$	里查孙常数
$\mathbf{b}$	基矢; 倒格子基矢; 滑移矢量
$b$	迁移率比; 宽度
$B$	磁感应强度
$B$	磁感应强度
$c$	真空光速; 俄歇系数
$\mathbf{c}$	基矢
$C$	俘获速率; 电容; 态密度 $C\epsilon^{1/2}$ 的常数系数; 离子性对成键态和反成键态能量间隙的贡献
$C_A$	积累层电容
$C_D$	耗尽层电容
$C_{Dm}$	耗尽层电容最小值
$C_{FB}$	平带电容
$C_i$	绝缘层电容
$C_{it}$	界面态电容
$C_I$	反型层电容
$C_s$	半导体表面层电容
$d$	厚度
$d_i$	绝缘层厚度
$d_s$	半导体空间电荷层厚度

$D$	扩散系数; 态密度
$D_n$	电子扩散系数
$D_p$	空穴扩散系数
$e$	电子电荷绝对值
$E$	电子能量; 电场强度; 激发速率
$E_A$	受主电子态能量
$E_C$	导带边能量
$E_D$	施主电子态能量
$E_F$	费米能级
$E_{Fe}$	电子准费米能级
$E_{Fh}$	空穴准费米能级
$E_{Fi}$	本征费米能级
$E_{Fn}$	n型半导体费米能级
$E_{Fp}$	p型半导体费米能级
$E_i$	本征费米能级
$E_M$	表面或界面处最大电场
$E_t$	陷阱能级
$E_V$	价带边能量
$\mathcal{E}$	电场强度
$f$	分布函数; 占有几率
$f_A$	受主能级占有几率
$f_D$	施主能级占有几率
$f_i$	离子性
$f_p$	空穴占有几率
$f_0$	零场分布函数
$F$	自由能; 力
$F$	力



$F$	费米积分
$g$	杂质能级自旋简并度; 态密度; 朗德因子
$G$	产生速率; 电导
$h$	普朗克常数
$\hbar$	$\hbar = h/2\pi$
$H$	哈密顿算符; 焓
$I$	电流强度
$I_g$	产生电流
$I_{ph}$	光电流
$I_P$	峰值电流
$I_{PM}$	光磁电流
$j$	电流密度
$\mathbf{j}$	电流密度
$j_n$	电子电流密度
$j_p$	空穴电流密度
$j_0$	饱和电流密度
$J$	光子流密度
$J_n$	电子流密度
$J_p$	空穴流密度
$k$	玻尔兹曼常数
$k$	消光系数; 电子波矢
$\mathbf{k}$	电子波矢
$K$	反应平衡常数
$l$	长度
$L$	扩散长度; 长度
$L_D$	德拜长度
$L_n$	电子扩散长度

$L_p$	空穴扩散长度
$m$	有效质量
$m_d$	态密度有效质量
$m_l$	纵向有效质量
$m_n$	电子有效质量
$m_p$	空穴有效质量
$m_{ph}$	重空穴有效质量
$m_{pl}$	轻空穴有效质量
$m_t$	横向有效质量
$m_0$	自由电子质量
$n$	电子浓度; 振动量子数; 实折射率
$n_D$	施主上电子浓度
$n_i$	本征载流子浓度
$n_s$	表面电子浓度
$n_t$	陷阱上电子浓度
$n_0$	平衡电子浓度
$N$	原子密度
$N_A$	受主浓度
$N_c$	导带等效态密度
$N_{depl}$	耗尽层电离杂质面密度
$N_D$	施主浓度
$N_{it}$	界面态面密度
$N_I$	电离杂质浓度; 间隙原子浓度; 界面荷电中心面密度
$N_{inv}$	反型载流子面密度
$N_q$	波矢为 $q$ 的声子数
$N_s$	肖特基缺陷浓度
$N_V$	价带等效态密度

$N^*$	约化浓度
$p$	空穴浓度, 平衡空穴浓度
$p_h$	重空穴浓度
$p_l$	轻空穴浓度
$p_s$	表面空穴浓度
$p_t$	陷阱上空穴浓度
$p_0$	平衡空穴浓度
$P$	动量; 蒸气压; 散射几率; 吸收几率
$P_H$	平面霍尔系数
$q$	声子波矢
$q$	声子波矢
$Q$	电荷面密度
$Q_B$	耗尽层电荷面密度
$Q_{B M}$	耗尽层最大电荷面密度
$Q_f$	固定电荷面密度
$Q_{it}$	界面态电荷面密度
$Q_{ox}$	氧化层电荷面密度
$Q_s$	半导体表面层电荷面密度
$r$	原子半径; 直接复合系数; $\tau_{CC} \epsilon^r$ 中的指数
$r_D$	扩散等效电阻
$r_g$	产生复合等效电阻
$r_H$	霍尔因子
$r_n$	电子俘获系数
$r_p$	空穴俘获系数
$R$	霍尔系数; 电阻; 复合速率
$R_B$	磁场下的电阻
$R_G$	接触电阻

$R_s$	表面复合速率; 饱和区霍尔系数
$R_0$	零磁场电阻率
$s$	等价能谷数; 位移; 瞄准距离; 激发几率; 距离
$S$	熵; 表面复合速度; 黄-李因子
$t$	时间
$T$	温度; 隧道穿透几率; 渡越时间
$T_M$	磁阻系数
$u$	布洛赫波的周期性调制函数
$U$	内能
$v$	速度
$v$	速度
$v_d$	漂移速度
$v_D$	扩散速度
$v_s$	声速
$v_{st}$	饱和速度
$v_T$	热运动速度
$V$	晶体体积; 电压; 电势; 势能
$V_c$	转变电压
$V_D$	自建势
$V_{FB}$	平带电压
$V_H$	霍尔电压
$V_i$	绝缘层上的压降
$V_{ms}$	半导体金属间接触电势差
$V_P$	平面霍尔电压
$V_{PM}$	光磁电压
$V_s$	表面势
$w$	宽度

$W$	热力学几率; 能量; 功函数; 跃迁几率
$x$	空间电荷区宽度, 化合物的组成成分
$X$	负电性
$Z$	以 $e$ 为单位的电荷数
$\alpha$	输运系数; 吸收系数
$\beta$	输运系数
$\delta$	间隙宽度
$\epsilon$	相对介电常数
$\epsilon_i$	绝缘体的相对介电常数
$\epsilon_s$	半导体的相对介电常数
$\epsilon_0$	真空电容率
$\epsilon$	相对带边的载流子能量
$\epsilon_A$	受主电离能
$\epsilon_D$	施主电离能
$\epsilon_F$	参考带边的费米能
$\epsilon_g$	禁带宽度
$\epsilon_i$	电离能
$\zeta$	相对带边的费米能
$\eta$	约化费米能, $\eta = (E_F - E_c)/kT$ ; 比例分数
$\theta$	角度; 霍尔角; 散射角
$\theta_n$	电子霍尔角
$\theta_p$	空穴霍尔角
$\lambda$	波长
$L$	牵引长度
$\mu$	迁移率; 有效质量比 $m_n/m_p$ ; 化学势
$\mu_H$	霍尔迁移率
$\mu_n$	电子迁移率

$\mu_p$	空穴迁移率
$\nu$	频率
$\xi$	约化电子能量 $\xi = \epsilon/kT$
$\rho$	电阻率; 电荷密度
$\rho_B$	磁场下电阻率
$\rho_0$	零磁场电阻率
$\sigma$	电导率
$\sigma_0$	零磁场电导率
$\sigma^{(1)}$	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
$\tau$	寿命, 弛豫时间, 时间常数
$\tau_d$	介电弛豫时间
$\varphi$	方位角; 分布函数改变量, 电子波函数
$\phi$	势垒高度; 角度
$\chi$	电子亲和能
$\psi$	电子波函数, 角度
$\omega$	迴旋频率
$\Omega$	立体角

# 目 录

重要符号表	1
第一章 晶格结构和结合性质	1
§ 1.1 晶体的结构	1
§ 1.2 半导体的结合性质	12
§ 1.3 晶格缺陷	23
§ 1.4 半导体表面的再构	34
第一章参考文献	38
第二章 半导体中的电子状态	41
§ 2.1 晶体中的能带	41
§ 2.2 晶体中电子的运动	52
§ 2.3 导电电子和空穴	60
§ 2.4 常见半导体的能带结构	65
§ 2.5 杂质和缺陷能级	80
§ 2.6 重掺杂半导体	96
§ 2.7 表面态	99
第二章参考文献	103
第三章 电子和空穴的平衡统计分布	108
§ 3.1 费米分布函数	109
§ 3.2 载流子浓度对费米能级的依赖关系	112
§ 3.3 本征载流子浓度	118
§ 3.4 非本征半导体的统计	121
§ 3.5 简并情形的统计	137
§ 3.6 费米能和化学势	141
§ 3.7 化合物半导体中的自补偿	147
第三章参考文献	152
第四章 输运现象	154
§ 4.1 电导和霍尔效应的分析	154

§ 4.2	载流子的散射	169
§ 4.3	电导的统计理论	181
§ 4.4	霍尔效应的统计理论	190
§ 4.5	磁阻	202
附录 4.1	电阻率和霍尔效应的测量方法	214
附录 4.2	玻尔兹曼积分微分方程和弛豫时间的存在性	218
附录 4.3	电阻率和杂质浓度的对应关系	224
第四章参考文献		225
<b>第五章 过剩载流子</b>		227
§ 5.1	过剩载流子及其产生和复合	227
§ 5.2	过剩载流子的扩散	233
§ 5.3	过剩载流子的漂移和扩散	241
§ 5.4	双极扩散和双极漂移	248
§ 5.5	丹倍效应和光磁效应	252
§ 5.6	表面复合对寿命的影响	255
§ 5.7	直接复合	259
§ 5.8	间接复合	272
§ 5.9	陷阱效应	289
§ 5.10	空间电荷的弛豫	297
第五章参考文献		299
<b>第六章 pn 结</b>		303
§ 6.1	pn 结及其伏安特性	303
§ 6.2	pn 结电容	317
§ 6.3	pn 结的光生伏特效应	333
§ 6.4	pn 结中的隧道效应	339
第六章参考文献		351
<b>第七章 半导体表面层和 MIS 结构</b>		354
§ 7.1	表面感生电荷层	354
§ 7.2	MIS 电容	360
§ 7.3	界面态及其电容效应	379
§ 7.4	表面电导和场效应	396



§ 7.5 表面复合	403
§ 7.6 表面量子化	408
§ 7.7 沟道迁移率	413
附录 7.1 半导体表面层电荷和电容作为 $V_g$ 的函数的 一般表示式	420
第七章参考文献	422
<b>第八章 金属半导体接触和异质结</b>	<b>427</b>
§ 8.1 金属-半导体接触	428
§ 8.2 肖特基二极管的电流	433
§ 8.3 势垒高度	446
§ 8.4 异质结	457
§ 8.5 异质结中的电流	469
§ 8.6 半导体超晶格	478
§ 8.7 空间电荷限制电流	481
第八章参考文献	490
<b>主题索引</b>	<b>496</b>
<b>重要的物理常数</b>	<b>511</b>