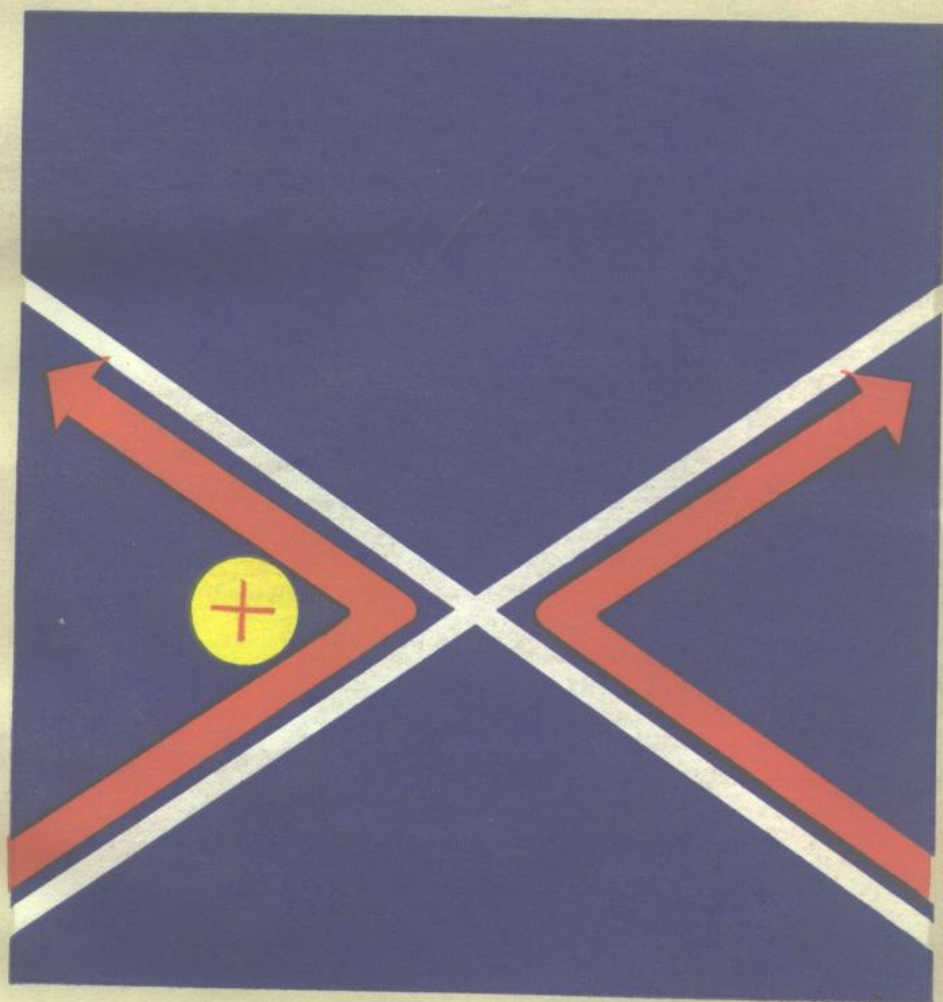


半导体物理学

K. SEEGER 著



徐 乐 钱建业 译 叶良修 校

人民教育出版社

半导体物理学

(西德) K. Seeger 著

徐 乐 钱建业 译

叶良修 校

人民教育出版社

内 容 提 要

本书共分十四章（在翻译时略去了原书的第十四章表面性质）。内容包括半导体的基本性质，能带结构，半导体统计学，非简并电子气的电荷与能量输运，载流子的扩散，球形单谷模型、多谷模型、扭曲球模型的载流子输运以及输运现象的量子效应。还包括杂质碰撞电离和雪崩击穿、光的吸收和反射、光电导、半导体的光产生及其他半导体。

本书系外国研究生教材，可供我国物理、半导体、电子技术等方面的高年级大学生、研究生以及从事这方面工作的科技工作者和教师参考。

本书由南开大学徐乐、钱建业翻译、北京大学叶良修校订。

高等学校教学参考书
半 导 体 物 理 学
(西德) K. Speger 著
徐 乐 钱建业 译
叶良修 校

*

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
民族印刷厂印装

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 19.5 字数 460,000
1980 年 1 月第 1 版 1980 年 12 月第 1 次印刷
印数 1—10,000
书号 13012·0424 定价 1.70 元

序 言

本书主要是为学习电子工程和物理的学生编写的,是供高年级或研究生课程使用的半导体物理学教科书。每周三个学时,供三学期使用。本书可与固体物理学教程结合使用。学习本书应具备电动力学的基础知识,有些章节还需要有量子力学的基本知识。本书侧重于物理方面而不是工艺方面。事实上,对于未来的物理学家和电子工程工程师来说,半导体物理学是个很必要的、极好的实践领域,为他们提供了运用基础课程中所学到的许多物理定律的机会。

本书详细讨论了半导体的输运性质和光学性质。作者决定删去对某些半导体材料性质的一般描述,而加进一些数学推导的“中间”式子,以便于不是专搞理论物理的读者阅读。鉴于半导体物理学领域内每年发表的论文多达数千篇,且分散于 30 多种期刊上,如果没有在《固体物理》(“Solid State Physics”),《固体物理进展》(“Festkörper-Probleme/Advances in Solid State Physics”)《半导体和半金属》(“Semiconductors and Semimetals”)、和《半导体进展》(“Progress in Semiconductors”)等丛书上所发表的一些相当好的专题性评论文章,要想一个人单独地写一本内容广泛的书是不可能的。作者从这些评论中受益非浅。

所有式子均用 MKS 有理单位制写成,但在数值举例中则按半导体物理学的惯例,用 cm 代替 m,用 g 代替 kg。对于学生来说,有一点是很重要的,就是有时能够通过量纲分析来核对某一问题的理论叙述,这时用 MKS 制比用 cgs 制要简便得多。因此我希望从事理论工作的读者们能原谅我离开了他们的传统。

鉴于已经有很好的“习题及题解”一类的书籍,例如《固体物理习题》(“Problems in Solid State Physics”, H. J. Goldsmid, ed.,

New York:Academic Press,1969),其中三章是有关半导体物理内容的)以及《半导体物理习题汇编》(“Aufgabensammlung zur Halbleiterphysik”, by W. L. Bontsch-Brujewitsch et al.),所以本书省略了学生用的习题。我们大力提倡学生做这些习题,学会运用他新学到的技能。至于进一步的学习,我们建议阅读半年一期的半导体物理国际会议的会议录。

本书对于从事研究和研制的科学家和工程师当然也是有用的。书中列出了 650 篇以上的参考文献。

我的同事 M. W. Valenta 博士(曾和教授 J. Bardeen 博士一起工作并曾在洛斯阿拉莫斯科学实验室工作)阅读了本书手稿,并对英文文字提出了宝贵的意见,我在此谨表示谢意。我特别感谢奥地利格拉茨大学 M. Kriechbaum 博士的有益批评。此外,格拉茨大学教授 K. Baumann 博士、格拉茨大学 P. Kocevar 博士、维也纳技术大学教授 H. W. Pötzl 博士以及我们研究所的同事们都对本书提出了宝贵的批评和建议。我愉快地感谢 Jitka Fucik 夫人在本书排印上提供的无法估价的帮助,感谢 Viktoria Köver 夫人为本书绘制了 372 幅插图,感谢 H. Kahlert 博士在计算机和照相操作方面所做的工作。最后,我愿借此机会对我的妻子 Lotte 在手稿准备期间的耐心郑重地表示感谢。

作者

1973 年 6 月

于维也纳

重要符号表

下标: n =电子 p =空穴; i =本征传导, L 轻空穴, H 重空穴; l =纵向; t =横向; $-$ 右旋偏振光, $+$ 左旋偏振光

下标: X =中性 $\pm$ 单电离; ab 和 (ab) 是标积, $[ab]$ 是矢积(“交叉积”)

- a 晶格常数
- a 元胞的初基平移矢量; 辐射的偏振(单位向量)
- ac 交流
- a_B 玻尔半径
- A 受主
- A 矢势; 倒格子的初基平移矢量
- A_0 矢势的振幅
- A_S 声波振幅
- $\text{\AA}$ 单位, 埃(等于 10^{-8} 厘米)
- b 迁移率之比 μ_n/μ_p ; 样品宽度
- b 元胞的初基平移矢量
- B 磁感应; 倒格子的初基平移矢量
- B_{12}, B_{21} 爱因斯坦系数
- c 真空中的光速
- c 元胞的初基平移矢量
- c_l 平均纵向弹性常数
- c_v 晶格的等容比热
- CW 连续波
- C 晶胞; 电容; 本征载流子的密度常数

C	倒格子的初基平移矢量
d	p - n 结宽度; 发射极集电极间距离; 样品厚度
dc	直流
D	施主; 扩散系数; 弹性常数; 光学波形变势常数
D	电介质位移矢量
D_ρ	旋转矩阵
e	电荷(e^- 电子; e^+ 空穴)
e	沿 E 方向的单位矢量; 形变矢量或形变张量
e_G	Gallen 有效电荷
e_{ps}	压电常数
e_S	Szigeti 有效电荷
E	电场强度
E_0	极性光学波散射的有效场强
E_S	表面势垒处的电场强度
f	分布函数; Van-der-Pauw 因子; 射频频率
f_0	零场分布函数; 分布函数的球形对称部分
f_1	扩散近似中分布函数的漂移项
f_t	填满的陷阱或受主与总数之比
f_{vc}	带间跃迁的振子强度
F	自由能
F	电热场强度; 力
g	杂质能级的自旋简并度; 态密度
g_j	能级的简并度
G	产生率
h	普朗克常数; $\hbar = h/2\pi$
h_ρ	由原点指向第 ρ 个谷的单位矢量
H	哈密顿算符
H	磁场强度

H_{mn}	m 态和 n 态之间的微扰势 H_1 的矩阵元
I	电流; 光强
I_m	虚部
j	电流密度
j_s	反向偏置 p - n 结的饱和电流密度
j_t	激光阈电流密度
J	声能通量
k	消光系数
k	载流子的波矢; k' 散射后的载流子波矢; k_E 载流子波矢在电场方向的投影
k_B	玻尔兹曼常数
K	机电耦合系数; 各向异性系数 k_m/k_x
K_m	有效质量比 m_l/m_t
K_x	动量弛豫时间之比 τ_l/τ_t
l	样品长度; 有效 Franz-Keldysh 长度; 声子平均自由程
l_{ac}	声学波散射的载流子平均自由程
L	扩散长度; 罗仑兹数
L_D	德拜长度
m	载流子有效质量; 弹性电阻张量
m_d	态密度有效质量
m_0	自由电子质量
m_r	约化有效质量
m_H	霍耳有效质量
m_M	磁阻有效质量
m_σ	电导率有效质量
M	原子质量
n	电子浓度; 实折射率; 磁量子数
n_i	本征载流子浓度

g 表面势垒处的电子浓度

nN 晶体中的原子数;散射中心密度;等效谷的数目;复折射率

N_A 受主浓度

N_C 导带边的态密度因子

N_D 施主浓度

N_I 电离杂质浓度

N_q 热平衡时波矢为 ***q*** 的声子数

N_u 晶体中的晶胞数

p 空穴浓度;碰撞参数

P 晶体动量算符

P Kane 参量

P 介电极化

P_E 爱廷豪森系数

P_H 平面霍尔系数

q 电离杂质散射和声学波形变势散射之比

q 声子波矢

Q 单位时间单位体积产生的热

Q_N 能斯脱系数

Q_{Th} 汤姆逊热

r 反射系数(***r_∞***:垂直入射时的反射系数);***τ_mα_{ε^r}***中的指数

r 位置矢量

r_c 集电极阻抗

r_e 发射极阻抗

r_H 霍尔因子

R 电阻;薄片的反射比;光子通量的吸收速率

R_ε 实部

R_B 磁场下的电阻

R_H 霍尔系数

R_p	里德伯能量
s	表面复合速度
s_{RL}	里纪-杜勒克因子
S	散射率(S_+ 发射声子的散射几率, S_- 吸收声子的散射几率); 熵;熵输运参量;应变
S	坡印亭矢量
$S(E)$	多谷模型的对称方向上电导率之比 $\sigma(E)/\sigma(0)$
S_{RL}	里纪-杜勒克系数
t	时间
T	晶格温度;应力,张力;薄片的透射比
T_e	载流子温度
T_M	磁阻散射系数
u_s	声速
U	内能
v	载流子速度
v_d	漂移速度; v_{ds} 漂移速度的饱和值
V	电压或电势;晶体体积
V_D	p - n 结的扩散电压
w	晶体管基区宽度
w	热流密度
w_1	声学速率常数
w_2	谷际速率常数
$\mathcal{W}$	热力学几率
x_c	集电极基极结的座标
x_e	发射极基极结的座标
X	流体静压力
X_{kl}	应力张量
Z	以 e 为单位的离子电荷;温差电优值

α	以 m_0 为单位的倒有效质量张量; 电流放大因数; 吸收系数, 极性常数
β	$(\mu - \mu_0)/\mu_0 E^2$; 激光器增益因子
γ	$(\mu - \mu_0)/\mu_0 E^2$ 的各向异性部分
Δ	Kane 参量
ϵ	载流子能量
ϵ_{ac}	声学波形变势常数
ϵ_A	受主能量 $\epsilon_V + \Delta\epsilon_A$
ϵ_C	导带边
ϵ_D	施主能量 $\epsilon_C - \Delta\epsilon_D$
ϵ_{exc}	激子能量
ϵ_F	法拉第椭圆率
ϵ_G	禁带宽, $\epsilon_C - \epsilon_V$
ϵ_{ik}	形变张量
ϵ_n	能量本征值
ϵ_t	陷阱能量
ϵ_V	价带边
ζ	费密能; ζ_n : 相对于导带的费密能; ζ_p : 相对于价带的费密能
ζ_n^*, ζ_p^*	准费密能级
η	发光效率
θ	散射角 $\angle(k, k')$; $\angle(\langle 001 \rangle, E \text{ 或 } B)$
θ'	散射角 $\angle(a, q)$
θ	绝对温差电动势; 光学声子(德拜)温度
θ_F	法拉第角
θ_i	谷际声子温度
θ_V	佛克脱角
κ	静态相对介电常数; 热导率; 压缩系数
$\bar{\kappa}$	复相对介电常数(κ_r 实部; $-\kappa_i$ 虚部)

κ_0	真空电容率
κ_{opt}	光学相对介电常数
λ	T/T_c ; 波长 $= 2\pi\lambda$
A_p	k 空间变换矩阵
μ	迁移率
μ_0	欧姆迁移率
μ_{ac}	声学迁移率
μ_H	霍耳迁移率
μ_{ION}	电离杂质迁移率
μ_M	磁阻迁移率
μ_B	玻尔磁子
μ_0	真空磁导率 $= 1/\kappa_0 C^2$
μ_{Th}	汤姆逊系数
ν	频率
$\mathcal{E}_d, \mathcal{E}_u$	椭球等能面的形变势常数
π_{ik}	压阻
Π	珀尔帖系数
ρ	电阻率; 质量密度
ρ_B	磁场下的电阻率
σ	电导率; 散射截面
σ_w	电导率张量
τ	寿命
τ_d	介电弛豫时间
τ_i	谷际散射时间
τ_m	动量弛豫时间
τ_r	激光器上能级辐射寿命
τ_e	能量弛豫时间
φ	以 e 为单位的功函数; 方位角

ϕ	声学势
Φ	静电势
ψ	电子波函数; 角度 $\angle(j, \langle 100 \rangle \text{方向})$
ω	角频率
ω_C	迴旋频率
ω_e	振子的本征频率
ω_l	纵向声子角频率
ω_0	光学声子角频率
ω_p	等离子体角频率
ω_s	声子角频率
ω_t	横向声子角频率
Ω	立体角

目 录

重要符号表	1
第一章 半导体的基本性质	1
§ 1-1 绝缘体-半导体-半金属-金属	1
§ 1-2 正空穴	3
§ 1-3 传导过程、补偿、质量作用定律	5
第二章 能带结构	10
§ 2-1 单一势阱和周期重复势阱	10
§ 2-2 紧束缚于原子的电子的能带	20
§ 2-3 布里渊区	23
§ 2-4 等能面	35
第三章 半导体统计学	40
§ 3-1 费密统计	40
§ 3-2 杂质能级的占有因子	50
第四章 非简并电子气中电荷和能量的输运	57
§ 4-1 电子气的动力学理论	57
§ 4-2 电导率和它的温度依赖关系	57
§ 4-3 横向磁场中的霍耳效应	68
§ 4-4 磁阻	82
§ 4-5 科宾诺 (Corbino)电阻	87
§ 4-6 非均匀样品的磁阻	90

§ 4-7	平面霍尔效应	92
§ 4-8	热导率、罗伦兹数、与金属的比较	94
§ 4-9	温差电(塞贝克)效应	99
§ 4-10	汤姆逊和珀尔帖效应	107
§ 4-11	热磁效应	113
§ 4-12	压阻	123
§ 4-13	热电子(hot electrons)和能量弛豫时间	129
§ 4-14	高频电导	135
§ 4-15	噪声	137
第五章 载流子的扩散过程		143
§ 5-1	注入和复合	143
§ 5-2	扩散和爱因斯坦关系	145
§ 5-3	p - n 结	152
§ 5-4	准费密能级	162
§ 5-5	晶体管	164
§ 5-6	金属-半导体接触	170
§ 5-7	各种类型的晶体管	172
§ 5-8	丹倍效应和光电磁效应	175
§ 5-9	光生伏特效应	179
§ 5-10	热载流子扩散	182
第六章 球形单谷模型中的散射过程		186
§ 6-1	中性杂质散射	186
§ 6-2	弹性散射过程	190
§ 6-3	电离杂质散射	194
§ 6-4	载流子的声学波形变势散射	199
§ 6-5	热载流子(hot carriers)的声学波形变势散射	203
§ 6-6	电离杂质散射与声学波形变势散射的组合	210
§ 6-7	压电散射	217
§ 6-8	晶体的声子谱	220
§ 6-9	非弹性散射过程	230

§ 6-10	动量平衡方程和移位麦克斯韦分布	235
§ 6-11	光学波形变势散射	239
§ 6-12	极性光学波散射	250
§ 6-13	载流子-载流子散射	259
§ 6-14	杂质传导和跳跃过程	261
§ 6-15	位错散射	263
第七章 多谷模型中的电荷输运及散射过程		271
§ 7-1	形变势张量	271
§ 7-2	电导率	275
§ 7-3	弱磁场中的霍耳效应	280
§ 7-4	弱场磁阻	282
§ 7-5	等效谷际散射和能谷再分布效应	288
§ 7-6	温载流子和热载流子的电流磁现象	301
§ 7-7	非等效谷际散射、负微分电导和耿氏振荡	307
§ 7-8	声电效应	322
第八章 扭曲球面模型中载流子的输运		336
§ 8-1	能带和态密度	336
§ 8-2	电导率	342
§ 8-3	霍耳效应和磁阻	342
§ 8-4	温空穴和热空穴	349
第九章 输运现象中的量子效应		354
§ 9-1	隧道二极管	354
§ 9-2	磁量子效应	360
§ 9-3	载流子的磁冻结现象	366
§ 9-4	磁声子效应	369
第十章 碰撞电离和雪崩击穿		378
§ 10-1	均匀半导体中的低温碰撞电离	378
§ 10-2	p - n 结中的雪崩击穿	385

第十一章	光的吸收和反射	392
§ 11-1	基本吸收和能带结构	392
§ 11-2	吸收限：对温度、压力、合金成份和简并性的 依赖关系	397
§ 11-3	激子吸收	408
§ 11-4	磁场下的带间跃迁	411
§ 11-5	Franz-Keldysh 效应（电吸收和电反射）	416
§ 11-6	杂质吸收	421
§ 11-7	极性半导体中的晶格反射	429
§ 11-8	多声子晶格吸收	433
§ 11-9	基本光吸收限的量子力学处理	437
§ 11-10	自由载流子的吸收和反射	443
§ 11-11	回旋共振	467
§ 11-12	自由载流子的磁光效应	475
§ 11-13	带间磁光效应	485
§ 11-14	磁等离子体波	487
§ 11-15	非线性光学	492
§ 11-16	光子曳引(光电效应)	498
第十二章	光电导	508
§ 12-1	光电导动力学	508
§ 12-2	锗中的深能级	514
§ 12-3	受主的俘获截面	522
第十三章	半导体产生的光振荡	525
§ 13-1	发光二极管	525
§ 13-2	半导体激光器	529
第十四章	其它半导体	542
§ 14-1	超导半导体	542
§ 14-2	液态、玻璃状和无定形半导体	544
§ 14-3	有机半导体	557