



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光电物理基础

GUANGDIAN WULI JICHU

主编 杨亚培 张晓霞



电子科技大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光电物理基础

主 编 杨亚培 张晓霞

副主编 吴志明 戴基智 刘 爽

电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光电物理基础 / 杨亚培, 张晓霞主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2009. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5647-0292-2

I. 光… II. ①杨…②张… III. 光电子学—高等学校—教材 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 128441 号

内 容 简 介

本书以量子力学与统计物理和固体物理与半导体物理讲义为基础, 经多次修改、扩充而成。全书分上、下两篇, 共十八章。包括量子力学基本原理、方法(量子力学矩阵表示、微扰近似方法)、应用(一维定态问题、电子自旋及氢原子)以及粒子系统的量子力学性质。热力学部分以实验观测为基础, 以热力学定律为依据, 应用数学和逻辑演绎的方法来分析物质各种宏观性质之间的关系。统计物理部分主要介绍基本概念、基本假设、主要的分布函数及其应用。由分布函数描述玻色子系统、费米子系统和玻尔兹曼系统的热运动规律。固体物理与半导体物理部分主要介绍晶体结构、原子在平衡位置附近作微振动, 介绍一维晶格振动、晶格振动的量子化, 引出格波和声子的概念、晶体中的电子状态、平衡状态下的半导体和非平衡载流子。本教材适合电子科学与技术、光信息科学与技术、电子工程专业选修《光电物理》课程的(非物理专业的)理工科学生(主要为本科生)使用, 亦可作为研究生、工程技术人员或其他人员作为物理基础方面的参考书。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光电物理基础

主 编 杨亚培 张晓霞

副主编 吴志明 戴基智 刘 爽

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 朱 丹

责任编辑: 朱 丹

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都金龙印务有限责任公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 26 字数 633 千字

版 次: 2009 年 8 月第一版

印 次: 2009 年 8 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-0292-2

定 价: 48.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 邮购部电话: 028-83208003。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

《光电物理基础》这本教材是作者多年来给电子科学与技术专业本科生讲授量子力学与统计物理和固体物理与半导体物理课程的系统总结。材料的选择以及讲述的顺序都进行了适度的调整，将内容分为原理、方法、应用。将原理集中，在之后安排其他内容，便于学生掌握。这与一般的教材安排不同，是作者多年讲授该课程实践的经验总结。

本课程涉及面广，涵盖了量子力学、统计物理、固体物理和半导体物理等内容，课程相对而言难度大，如何从宜于理解的角度，做到体系结构合理、内容简明，是本书的初衷。

由于量子力学中描述微观粒子的运动规律与日常生活经验有质的差异，所以学习量子力学的难点是基本概念的建立和基本原理的理解。在量子力学部分应特别注意“原理”、“方法”、“应用”之间的联系，因此将繁琐的推导放在“附录”中，安排加“*”的章节作为选读内容，以拓展知识面。

统计物理部分，在热力学基本理论的基础上，介绍了统计物理的基本原理、玻尔兹曼统计、玻色统计和费密统计，在统计物理的应用方面，重点介绍利用统计物理理论对不同情况下的热容量进行分析。

固体物理部分重点阐述基本概念、基本理论和基础知识，阐述详尽细致，注重深入浅出，避开复杂的数学推导，给读者以清晰的物理模型，并力图在有限的篇幅内反映出固体物理学学科的发展趋势。

半导体物理部分以半导体材料中载流子的行为为主线展开讨论，首先介绍半导体材料中载流子的产生、复合的基本原理与规律，再分别讨论无外场和有外场情况下载流子的产生、传输行为以及所体现出来的特殊性能，在此基础上介绍p-n结、金-半接触、低维结构等光电器件基本结构的工作原理及特征。

本教材由电子科技大学杨亚培教授和张晓霞教授担任主编，由电子科技大学刘永智教授和西南交通大学潘炜教授担任主审。本书量子力学部分由杨亚培教授和张晓霞教授编写，统计物理部分由吴志明教授编写，固体物理部分由戴基智副教授和刘爽副教授编写，半导体物理部分由刘爽副教授编写。本教材适合电子科学与技术、光信息科学与技术、电子工程专业选修《光电物理》课程的（非物理专业的）理工科学生（主要为本科生）使用，亦可作为研究生、工程技术人员或其他人员作为物理基础方面的参考书。本书作为光电物理入门的基础教材，有了这个扎实的基础，同学们可以较顺利地进入现代物理领域和相关交叉学科课程的学习。

学海无涯，才学有限。错误与不妥之处在所难免，恳切希望广大专家、读者不吝指教，以便今后改进。

目 录

上 篇

第 1 章 绪论.....	2
1.1 经典物理学的困难.....	2
1.2 光的波粒二象性.....	3
1.3 原子的线光谱和原子结构理论.....	9
1.4 微粒的波粒二象性.....	10
习题一.....	13
第 2 章 波函数和薛定谔方程.....	14
2.1 波函数的统计解释.....	14
2.2 态叠加原理.....	16
2.3 薛定谔方程.....	22
2.4 粒子流密度和粒子数守恒定律.....	25
2.5 定态薛定谔方程.....	26
习题二.....	28
第 3 章 量子力学中的力学量.....	29
3.1 力学量的算符表示.....	29
3.2 力学量的本征值和本征函数.....	31
3.2.1 力学量的本征值和本征函数.....	31
3.2.2 动量的本征值和本征函数.....	33
3.2.3 角动量的本征值和本征函数.....	35
3.3 厄密算符本征函数正交完备性.....	39
3.4 算符与力学量的关系.....	41
3.5 算符的对易关系 两力学量同时有确定值的条件 不确定关系.....	43
3.6 力学量平均值随时间的变化守恒定律.....	48
习题三.....	51
第 4 章 态和力学量的表象.....	54
4.1 态的表象.....	54
4.2 算符的矩阵表示.....	56
4.3 量子力学公式的矩阵表述.....	59
4.4 么正变换.....	61
4.5 狄喇克符号.....	64

习题四.....	68
第 5 章 求解定态薛定谔方程实例.....	69
5.1 金属中的自由电子.....	69
5.2 谐振子.....	74
5.2.1 经典力学中的谐振运动.....	74
5.2.2 量子力学中的谐振子.....	76
5.3 势垒贯穿.....	80
5.4 电子在库仑场中的运动.....	85
5.5 氢原子.....	89
习题五.....	94
第 6 章 微扰理论.....	96
6.1 非简并定态微扰理论.....	96
6.2 简并情况下的微扰理论.....	100
6.3 氢原子的一级斯塔克效应.....	101
6.4 变分法.....	104
6.5 氢原子基态(变分法).....	105
6.6 与时间有关的微扰理论.....	108
6.7 跃迁几率.....	110
6.8 光的发射和吸收.....	114
6.9 选择定则.....	119
习题六.....	121
第 7 章 自旋与全同粒子.....	122
7.1 电子自旋.....	122
7.2 电子的自旋算符和自函数.....	123
*7.3 简单塞曼效应.....	128
7.4 两个角动量的耦合.....	129
7.5 光谱的精细结构.....	133
7.6 全同粒子的特性.....	137
7.7 全同粒子体系的波函数 泡利原理.....	139
7.8 两个电子的自旋函数.....	141
7.9 氢原子(微扰法).....	144
*7.10 氢分子(海特勒-伦敦法)化学键.....	149
习题七.....	151
附录.....	153

第 8 章 热力学基础.....	162
8.1 热力学的基本概念.....	162
8.2 热力学的几个基本定律.....	166
8.2.1 热力学第一定律.....	166
8.2.2 热力学第二定律.....	169
8.2.3 热力学第三定律.....	173
8.3 热力学函数的意义.....	174
8.4 麦氏关系与特性函数.....	177
8.5 常见系统的热力学性质.....	180
8.5.1 电介质系统.....	180
8.5.2 磁介质系统.....	182
习题八.....	184
第 9 章 统计力学原理.....	186
9.1 概念与假设.....	186
9.1.1 微观态与宏观态.....	186
9.1.2 宏观量与微观量.....	190
9.1.3 微正则分布.....	191
9.1.4 基本假定.....	193
9.2 热力学量的统计意义.....	193
9.2.1 热量与功 广义力.....	193
9.2.2 温度.....	194
9.2.3 熵.....	195
9.2.4 体系的热力学平衡条件.....	196
9.3 正则分布与巨正则分布.....	199
9.3.1 正则分布.....	199
9.3.2 巨正则分布.....	200
9.3.3 分布函数与热力学量的关系.....	201
9.4 统计力学的应用.....	202
9.4.1 配分函数与巨和的计算.....	203
9.4.2 顺磁固体的微观理论.....	204
9.4.3 吸附现象的微观理论.....	205
习题九.....	206
第 10 章 玻尔兹曼统计.....	208
10.1 粒子在单粒子态上的三种分布.....	208
10.1.1 费米分布.....	208
10.1.2 玻色分布.....	208

10.1.3 玻尔兹曼分布	209
10.2 经典分布的性质	211
10.2.1 经典分布的性质	211
10.2.2 状态数与态密度的计算	214
10.3 理想气体的经典分布	217
10.3.1 单原子理想气体的热力学量	217
10.3.2 麦克斯韦 (Maxwell) 分布	218
10.3.3 气体电介质的极化	220
10.4 热容量的经典理论	221
10.4.1 能量均分定理	221
10.4.2 气体热容量的经典理论	222
10.4.3 固体热容量的经典理论	224
10.4.4 固体和气体热容量的量子理论	225
习题十	227
第 11 章 玻色统计和费密统计	229
11.1 量子分布的性质	229
11.1.1 费米分布	229
11.1.2 玻色分布	231
11.2 玻色凝聚	232
11.2.1 转变温度 T_c	232
11.2.2 $T < T_c$ 时基态上的粒子数 N_0	232
11.3 光子气体	233
11.4 声子气体	235
11.4.1 声子的概念	235
11.4.2 声子气体的性质	235
11.4.3 固体热容量的德拜理论	236
11.5 金属中的自由电子气	238
习题十一	239
参考文献	241

下 篇

第 12 章 晶体结构	244
12.1 晶体结构的周期性	244
12.1.1 格点与基元	244
12.1.2 简单格子与复式格子	244
12.1.3 原胞与晶胞	245

12.2 常见的晶体结构.....	246
12.2.1 简单立方.....	246
12.2.2 体心立方.....	246
12.2.3 面心立方.....	247
12.2.4 氯化钠结构.....	248
12.2.5 氯化铯结构.....	248
12.2.6 金刚石结构.....	249
12.3 密堆积 配位数.....	249
12.4 晶系 布拉菲晶胞.....	251
12.4.1 晶系.....	251
12.4.2 14 种布拉菲晶胞.....	252
12.5 晶体的对称性.....	253
12.5.1 宏观对称要素.....	253
12.5.2 点群及空间群.....	254
12.6 晶向指数与晶面指数.....	255
12.6.1 晶向与晶向指数.....	255
12.6.2 晶面与晶面指数.....	256
12.7 倒格子与布里渊区.....	257
12.7.1 倒格子.....	257
12.7.2 布里渊区.....	260
习题十二.....	263
第 13 章 晶格振动.....	264
13.1 一维单原子晶格振动.....	264
13.2 一维双原子晶格的振动.....	268
13.2.1 运动方程.....	268
13.2.2 色散关系.....	269
13.2.3 声学支的振动特点.....	270
13.2.4 光学支的振动特点.....	271
13.3 周期边界条件与格波数.....	272
13.3.1 周期边界条件.....	272
13.3.2 晶格振动的格波数.....	273
13.4 晶格振动的量子化与声子.....	273
13.4.1 晶格振动一般解的简正表示.....	274
13.4.2 晶格振动总能量的简正表示.....	275
13.4.3 声子.....	275
13.5 晶格比热.....	276
13.5.1 晶格比热的量子理论.....	276
13.5.2 爱因斯坦模型.....	278

13.5.3 德拜模型	278
习题十三	279
第 14 章 晶体中的电子状态	281
14.1 索末菲自由电子模型	281
14.1.1 电子的波函数和本征能量	281
14.1.2 能态密度	283
14.1.3 电子的分布函数	283
14.1.4 费米能级	284
14.1.5 电子比热	285
14.2 布洛赫定理	286
14.3 近自由电子近似	288
14.3.1 非简并微扰法	289
14.3.2 简并微扰法	290
14.3.3 能带性质	293
14.4 紧束缚近似	294
14.5 电子的准经典运动	296
14.6 导体 半导体 绝缘体 空穴	299
14.6.1 满带电子不导电	299
14.6.2 导体、绝缘体和半导体	300
14.6.3 空穴	301
习题十四	302
第 15 章 平衡状态下的半导体	304
15.1 半导体的能带结构	304
15.1.1 $E(E)$ 与 K 的关系	304
15.1.2 K 空间等能面	305
15.1.3 常见半导体的能带结构	306
15.2 本征半导体和杂质半导体	311
15.2.1 本征半导体及其导电机构	311
15.2.2 杂质半导体及其导电机构	311
15.3 热平衡载流子的统计分析	317
15.3.1 状态密度	317
15.3.2 载流子的统计分布	318
15.3.3 导带中的电子浓度和价带中的空穴浓度	319
15.3.4 载流子浓度乘积 $n_0 p_0$	321
15.3.5 本征半导体的载流子浓度	321
15.3.6 杂质半导体的载流子分布	323
15.3.7 n 型半导体的载流子浓度	324



日

三

18.1.4	p-n 结电容	380
18.1.5	p-n 结击穿	381
18.2	半导体表面	384
18.2.1	半导体表面态	384
18.2.2	表面电场效应	385
18.3	金属-半导体接触	387
18.3.1	金-半接触的势垒模型	388
18.3.2	金-半接触的整流理论	391
18.3.3	欧姆接触	393
18.4	半导体低维结构	394
18.4.1	异质结	394
18.4.2	超晶格	396
18.4.3	量子阱	399
习题十八		401
参考文献		402

上

篇

第 1 章 绪 论

量子力学是反映微观粒子（分子、原子、原子核、基本粒子等）运动规律的理论，它是深入了解物质的结构及其各种特性的基础，是 20 世纪 20 年代在总结大量实验事实和旧量子论的基础上建立起来的。

随着量子力学的出现，人类对于物质微观结构的认识日益深入，从而能较深刻地掌握物质的物理和化学的性能及其变化规律，并利用这些规律为生产开辟了广阔的途径。近代物理学的许多部分，其基本理论几乎都依据量子力学的原理，如光谱理论，原子、分子结构及其化学的理论，原子核结构的理论，固体理论，等等。这些理论不仅成功地解释了广泛的现象和实验事实，而且使人们对于一些现象的本质及其发生的规律有了比较正确和深入的认识，从而能够利用其来发展新的生产技术和制造出新的具有各种特殊性能的材料。

量子力学是建立在广泛的实验基础之上的。下面我们简单地介绍一下量子力学发展的背景。

1.1 经典物理学的困难

量子理论发展的过程是人们对于微观世界的认识逐步深化的过程。它的发展大致可以分为两个阶段，第一阶段是旧量子论（1900~1923 年），第二阶段是量子力学（1924 年~），1930 年以后又发展了量子电动力学、量子场论等。

旧量子论是量子力学的前驱。该理论首先提出微观运动中存在着不连续性这一概念，即某些基本微观过程，如能量、角动量的转换，是以不连续的（即跳跃的）方式进行的。这个概念与经典物理学不符，它是根据 19 世纪末以来大量的实验事实提出的。

到 19 世纪末，物理学对世界的认识可以概括如下：宇宙中主要存在两种客体——微粒和场（主要指电磁场，包括光）或波。微粒的运动遵照牛顿运动定律，电磁场则服从麦克斯韦方程。加上统计理论，原则上就可以从电子、原子、分子在电磁场作用下的微观运动出发来说明物质的结构及其各种宏观属性。

但是，随着生产和实验技术的不断发展，到 20 世纪初，就在物理学的经典理论取得上述重大成就的同时，人们发现了一些新的物理现象，例如黑体辐射、光电效应、原子的光谱线系以及固体在低温下的比热等，都是经典物理理论所无法解释的。这些现象暴露了经典物理学的局限性，突出了经典物理学与微观世界规律性的矛盾，从而为发现微观世界的规律打下了基础。黑体辐射和光电效应等现象使人们发现了光的波粒二象性；玻尔（Bohr）为解释原子的光谱线系提出了原子结构的量子论，由于这个理论只是在经典理论的基础上加进一些新的假设，因而未能反映微观世界的本质。旧量子论的这些缺点促使人们进一步去寻求新的、更符合客观事实的理论，由此更突出了认识微观粒子运动规律的迫切性。直到 20 世纪 20 年代，人们在光的波粒二象性的启示下，开始认识到微观粒子的波粒二象性，才开辟了建立量子力学的途径，量子力学就是在这样的情况下发展和建立起来的。

1.2 光的波粒二象性

量子力学的实验基础是物质的波粒二象性。人们首先发现的是光的波粒二象性，随后又发现电子、原子、分子等也具有波粒二象性。量子力学起源于光的量子理论。

光的干涉和衍射现象以及光的电磁理论从实验和理论两方面充分肯定了光的波动性。我们在这里回顾一下显示光的波动性的典型实验之一——双狭缝衍射实验。

图 1-1 中 A 是垂直于纸面的屏，屏上有两条相互平行的很窄的狭缝 S_1 和 S_2 ，两狭缝之间的距离为 d 。 B 是和 A 平行的另一个屏。 B 与 A 的距离 $D \gg d$ 。同一光源发出的光线穿过双狭缝在屏 B 上产生衍射图样。以 E_1 、 E_2 分别表示穿过狭缝 S_1 和 S_2 到达 P 点的光波振动：

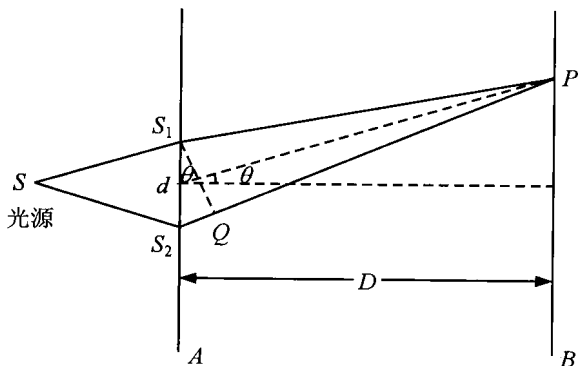


图 1-1 光的双狭缝衍射

$$E_1 = E_0 \cos \omega t$$

$$E_2 = E_0 \cos \left(\omega t + \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)$$

上式中的位相差 $\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$ 是这样得出的：在 S_2P 上取 Q 点，使 $S_1P = QP$ ，那么光线 S_1P 和 S_2P 的光程差是 $S_2Q = d \sin \theta$ ， θ 是衍射角。因为光程差为一个波长 λ 时，位相差恰好是 2π ，所以 E_2 和 E_1 的位相差是 $\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$ 。在 P 点的光波振动是：

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) \cos \left(\omega t + \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)$$

因而光在 P 点的强度是：

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) \quad (1.2-1)$$

式中， $I_0 = E_0^2$ 是穿过一个狭缝到达 P 点的光的强度。由式 (1.2-1) 可看出，当 P 点的位置满足关系式

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{d}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.2-2)$$

时，该点光的强度为最大： $I = 4I_0$ ；当 P 点的位置满足关系式 (1.2-3) 时，该点强度为零：

$$\sin \theta = \frac{2n+1}{2} \frac{\lambda}{d}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \tag{1.2-3}$$

虽然光的波动性有大量实验事实和光的电磁理论的支持，成功地说明了一切有关光的传播的问题，却始终没有能够满意地解释有关光的发射和吸收的问题，特别是有关黑体辐射和光电效应问题。

黑体辐射问题所研究的是辐射与周围物体处于平衡状态时的能量按波长（或频率）的分布。所有物体都发射出热辐射，这种辐射是一定波长范围内的电磁波。对于外来的辐射，物体有反射或吸收的作用。如果一个物体能全部吸收投射在它上面的辐射而无反射，这种物体就称为**绝对黑体**，简称**黑体**。一个空腔可以看成是黑体。当空腔与内部的辐射处于平衡时，腔壁单位面积所发射出的辐射能量和它所吸收的辐射能量相等。实验得出的平衡时辐射能量密度按波长分布的曲线，其形状和位置只与黑体的绝对温度相关，而与空腔的形状及组成的物质无关。

根据经典电动力学（麦克斯韦理论）和统计力学，可以导出黑体辐射问题中辐射的能量与频率之间的关系式，但是这样推得的公式却与实验结果严重地不相符。维恩（Wien）由热力学的讨论，并加上一些特殊假设得出一个分布公式——维恩公式。这个公式在如图 1-2 所示的短波部分与实验结果（图 1-2 中圆圈代表实验值）还符合，而在长波部分则显著不一致。瑞利（Rayleigh）和金斯（Jeans）根据经典电动力学和统计物理学也得出黑体辐射能量分布公式，他们得出的公式在长波部分与实验结果较符合，而在短波部分则完全不符（见图 1-2）。

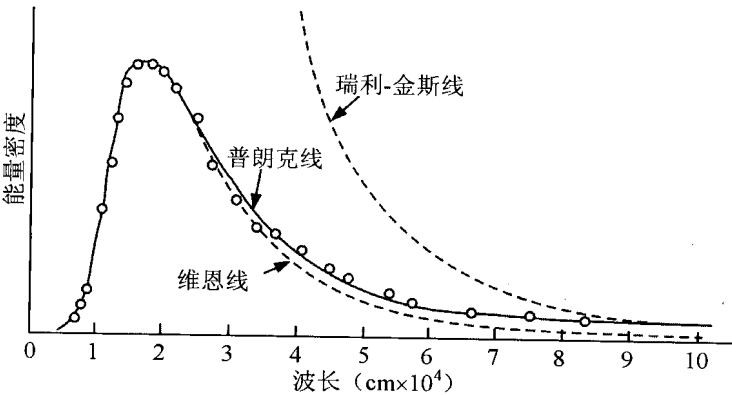


图 1-2 黑体辐射能量分布曲线

经过长期的研究和详细分析，普朗克（Planck）于 1900 年发现，要得到与实验结果相符的黑体辐射公式，需要假定：对于一定频率 ν 的电磁辐射，物体只能以 $h\nu$ 为能量单元，发射或吸收这一频率的电磁辐射，其中：

$$h = 6.62559(16) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

h 是一个普适常数，称为普朗克常数，又称为作用量子。基于这个假定，普朗克得到了与实验结果符合得很好的黑体辐射公式：

$$\rho_{\nu} d\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \tag{1.2-4}$$